



Formalisation et comparaison cognitives de modèles mentaux de novices et d'experts en situation de résolution de problèmes

Jean-Marc Charlot

► To cite this version:

Jean-Marc Charlot. Formalisation et comparaison cognitives de modèles mentaux de novices et d'experts en situation de résolution de problèmes. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Sherbrooke; Université Paris XI Orsay, 1998. Français. NNT: . tel-00941213

HAL Id: tel-00941213

<https://theses.hal.science/tel-00941213>

Submitted on 3 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
FACULTÉ DE GÉNIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

FORMALISATION ET COMPARAISON COGNITIVES
DE MODÈLES MENTAUX DE NOVICES ET D'EXPERTS
EN SITUATION DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

Thèse de Doctorat ès Sciences Appliquées

Spécialité : Génie Mécanique

Jean-Marc Charlot

Sherbrooke, (Québec), Canada

Juin 1998

Thèse préparée dans le cadre d'un programme de cotutelle
entre l'Université de Sherbrooke et l'Université de Paris-XI Orsay

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif de développer des méthodes formelles pour représenter et comparer les modèles mentaux des novices et des experts en situations de résolution de problèmes dans le but de faire progresser les connaissances de l'apprenant et ses stratégies de résolution de problèmes vers celles de l'expert. Pour cela notre étude aborde quatre domaines : la psychologie cognitive, la didactique des sciences, l'intelligence artificielle et le génie cognitif. Nous proposons un formalisme de représentations des modèles mentaux basé sur la description du problème tel qu'il est vu par l'apprenant d'une part et par l'expert d'autre part. Le même formalisme permet de couvrir l'étendue de la gamme d'expertise allant du novice à l'expert. La stratégie de résolution du problème est donnée en termes de description des objets (variables et concepts théoriques), des actions (résolution, consultation et unification) et des dépendances (conditions et propriétés) utiles à la résolution du problème posé. En se basant sur ce formalisme, nous proposons également un processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant en regard de celle donnée par l'expert. Ce processus analyse la cohérence interne des descriptions traduisant une représentation mentale, il exécute la représentation mentale en explorant les imbrications des descriptions et enfin il analyse la concordance entre la description donnée par l'apprenant et celle donnée par l'expert. Si des divergences sont observées, le processus émet des hypothèses quant à la cause possible des confusions et ceci afin d'identifier les notions manquantes ainsi que les conceptions erronées de l'apprenant. Ces critères traduisent des résultats issus de la théorie de la psychologie cognitive. Nous avons mis au point un prototype informatique qui intègre le formalisme et le processus de validation proposés. Ce prototype analyse les représentations mentales formalisées en tirant profit de techniques d'intelligence artificielle comme les cadres conceptuels, les réseaux sémantiques, les règles de production et différents types de moteurs d'inférences. La validation du prototype a été effectuée à l'aide de problèmes simples et variés, pour lesquels nous avons formalisé des représentations mentales hypothétiques d'apprenants et d'experts.

REMERCIEMENTS

Une thèse de doctorat est un travail de longue haleine qu'il est impossible et impensable de mener à bien, seul. C'est pour cela que je tiens particulièrement à remercier :

Le Professeur Bernard Marcos et le Professeur Jean Lapointe qui, après m'avoir extirpé du fin fond de la brousse, m'ont accueilli au sein de leur groupe de recherche et apporté leur confiance ainsi que toute l'aide nécessaire pour travailler sur ce projet. Leur soutien, leur implication personnelle et leurs encouragements n'ont cessé de m'accompagner tout au long de mon séjour parmi eux. Ils m'ont également guidé lors de mes premiers pas en enseignement. En plus de leur rôle de directeurs de thèse, je tiens à les remercier pour leur précieuse amitié.

Le Professeur Jean-Louis Ermine, d'avoir accepté de prendre en charge la codirection des recherches pour l'Université de Paris-XI Orsay. Les kilomètres d'océan qui nous séparaient pendant ces années n'ont été qu'un obstacle virtuel à l'intérêt qu'il a porté à mon travail. De ce fait, les échanges d'idées en tous genres (verbaux, e-mailés ou encore en "direct-live") n'ont pas eu à souffrir de cet éloignement. Merci également pour l'accueil que j'ai reçu lors de mon séjour au sein du Groupe de gestion des connaissances au CEA.

Les autres membres du Jury, le Professeur Guy Gouardères, le Professeur Jean-Marie Dirand et le Professeur Guy Payre, pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à cette thèse.

Les organismes financiers qui m'ont permis d'accomplir ces travaux de recherche : le Conseil de recherche en sciences humaines du Canada (CRSH), le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'Université de Sherbrooke.

Tous les membres du GRACO pour leur disponibilité et la bonne humeur quotidienne qui rendaient nos dures journées de labeur bien plus agréables, ainsi que toute la gang de joyeux drilles : mes amis de l'Université de Sherbrooke et les Croûtons avec qui j'ai passé de très agréables moments et non moins mémorables.

Ma famille et mes parents qui m'ont supporté durant ces années.



Ces pages, qui ont survécu à plusieurs années de doute, n'apportent toujours pas de réponse au proverbe baoulé qui s'interroge :

"Quel cadavre veut pas rentrer dans trou ?"

(Adaptation ivoirienne de : « Impossible n'est pas français »)

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 <i>L'information et la connaissance</i>	2
1.2 <i>Les systèmes tutoriels intelligents</i>	3
1.3 <i>La modélisation des représentations mentales.....</i>	5
CHAPITRE 2 LES MODÈLES MENTAUX	8
2.1 <i>Introduction.....</i>	8
2.2 <i>L'historique des modèles mentaux</i>	8
2.3 <i>Les différences de modèles mentaux entre les Novices et les Experts.....</i>	11
2.4 <i>Les protocoles de recherche pour établir les modèles mentaux.....</i>	23
2.4.1 <i>Une démarche générale décomposée en quatre étapes</i>	23
2.4.2 <i>La détermination d'un protocole approprié.....</i>	23
2.5 <i>L'enseignement est la science de la construction du savoir.....</i>	26
2.6 <i>La mise en situation de résolution de problèmes</i>	26
2.7 <i>L'évolution du modèle mental</i>	27
2.8 <i>Conclusion.....</i>	29
CHAPITRE 3 LES SYSTÈMES INFORMATISÉS DE FORMATION.....	30
3.1 <i>L'intelligence artificielle et les systèmes experts</i>	30
3.2 <i>L'historique des systèmes informatisés d'apprentissage</i>	31
3.2.1 <i>L'enseignement assisté par ordinateur.....</i>	31
3.2.2 <i>L'enseignement intelligemment assisté par ordinateur.....</i>	32
3.2.3 <i>L'E.I.A.O. Psychopédagogue.....</i>	33
3.3 <i>Les différentes approches de conception.....</i>	35

3.3.1	Une ossature qui fait l'unanimité	35
3.3.2	Les méthodes de représentation des connaissances	36
3.3.3	Le module expert	38
3.3.4	Le modèle étudiant	41
3.3.5	Le module tuteur	43
3.3.6	L'interface	47
3.3.7	Les systèmes multi-agents	50
3.4	<i>Les travaux importants et les perspectives</i>	52
3.5	<i>Conclusion</i>	54

CHAPITRE 4 LE FORMALISME DE MODÉLISATION DES REPRÉSENTATIONS MENTALES 55

4.1	<i>Introduction</i>	55
4.2	<i>Le formalisme de représentation des modèles mentaux</i>	55
4.2.1	La présentation du formalisme à partir d'un exemple	56
4.2.2	La liste des items disponibles	57
4.2.3	La description d'un objet	58
4.2.4	La description des actions	59
4.2.5	La description des dépendances	61
4.3	<i>Commentaires</i>	62
4.4	<i>Synthèse</i>	64

CHAPITRE 5 LE PROCESSUS DE VALIDATION DE LA DESCRIPTION FAITE PAR L'APPRENANT 67

5.1	<i>Introduction</i>	67
5.2	<i>L'évaluation de la cohérence (étape 1)</i>	69
5.3	<i>L'exécution de la description (étape 2)</i>	70
5.3.1	La détermination des dépendances évaluables (T6 et T7 selon T2)	71
5.3.2	Le lancement des actions déclenchables (T3, T4 et T5 selon T2)	71
5.3.3	La détermination de nouveaux objets (report dans T2)	72
5.3.4	Un exemple d'exécution	72
5.4	<i>L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales (étape 3)</i>	74
5.4.1	La génération d'hypothèses et de supputations	74
5.4.2	Les règles de concordance	75
5.4.3	L'élimination de la récursivité introduite par les règles de concordance	77
5.4.4	Un exemple d'évaluation de la concordance entre deux représentations mentales	78
5.5	<i>Conclusion</i>	82

CHAPITRE 6 LE PROTOTYPE	84
6.1 Introduction	84
6.2 Les caractéristiques de l'implantation informatique	84
6.2.1 Les choix technologiques	84
6.2.2 Les fonctionnalités	86
6.2.3 L'implantation informatique	87
6.3 Les limites.....	91
6.4 Conclusion.....	92
CHAPITRE 7 LES EXEMPLES ET LES RÉSULTATS	93
7.1 Introduction	93
7.2 Le problème de l'équation du second degré.....	94
7.2.1 Introduction.....	94
7.2.2 L'énoncé.....	94
7.2.3 La formalisation de la représentation mentale de l'expert.....	94
7.2.4 L'exécution de la représentation mentale de l'expert	98
7.2.5 La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant	101
7.2.6 L'exécution de la description faite par l'apprenant	103
7.2.7 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.....	104
7.2.8 Commentaires.....	108
7.3 Le problème du triangle	108
7.3.1 Introduction.....	108
7.3.2 L'énoncé.....	108
7.3.3 La formalisation de la représentation mentale de l'expert.....	109
7.3.4 L'exécution de la représentation mentale de l'expert	111
7.3.5 La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant	111
7.3.6 L'exécution de la description donnée par l'apprenant.....	113
7.3.7 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.....	114
7.3.8 Commentaires.....	116
7.4 Le problème du coureur	117
7.4.1 Introduction.....	117
7.4.2 La formalisation de la représentation mentale erronée de l'apprenant	117
7.4.3 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.....	119
7.4.4 Commentaires.....	122
7.5 Le problème de thermodynamique	123
7.5.1 Introduction.....	123
7.5.2 L'énoncé.....	123

7.5.3	La formalisation de la représentation mentale de l'expert.....	123
7.5.4	L'exécution de la description donnée par l'expert	126
7.5.5	La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant	127
7.5.6	L'exécution de la description faite par l'apprenant	128
7.5.7	L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.....	129
7.5.8	Commentaires.....	133
7.6	<i>Conclusion</i>	135
CONCLUSION		137
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		142

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 L'importance de l'analyse des représentations mentales (Québec français, déc. 1980).....	6
Figure 2-1 La distinction entre novice et expert selon deux conceptions	14
Figure 2-2 La machine d'Atwood, comme exemple de mauvaise représentation mentale.....	15
Figure 2-3 Un problème de plan incliné.....	17
Figure 2-4 Un exemple de modèle mental d'un novice	18
Figure 2-5 Un exemple de modèle mental d'un expert.....	18
Figure 2-6 L'évolution des connaissances au cours de l'apprentissage	21
Figure 3-1 La structure d'un programme d'E.A.O. classique [LELOUCHE, 1988].....	31
Figure 3-2 La structure d'un logiciel d'E.I.A.O. [LELOUCHE, 1988].....	33
Figure 3-3 La structure d'un système d'E.I.A.O. psycho-pédagogue [LELOUCHE, 1988]	34
Figure 3-4 La structure quasi-unanime d'un système expert dédié à l'apprentissage [adaptation d'ANDERSON, 1988]	36
Figure 3-5 Un exemple de tuteur socratique utilisé dans Why [STEVENS et COLLINS, 1977].....	45
Figure 3-6 Un exemple de règle pour le tuteur utilisant le discours socratique [COLLINS, 1976]	45
Figure 4-1 L'organisation des métaconcepts intervenant dans le formalisme	65
Figure 4-2 Le formalisme de représentation du modèle mental, appliqué au problème du coureur ..	66
Figure 5-1 Le processus de validation de la description faite par l'apprenant.....	68
Figure 6-1 La fenêtre de dialogue avec le prototype	86
Figure 6-2 La représentation sous forme d'arbre binaire de l'équation $PV = nRT$	88
Figure 6-3 L'arbre obtenu après isolation de T dans l'équation $PV = nRT$	89
Figure 7-1 Le triangle de l'énoncé	108
Figure 7-2 Le triangle vu par l'expert	109
Figure 7-3 Le triangle vu par l'apprenant.....	112
Figure 7-4 La description erronée de l'apprenant pour le problème du coureur.....	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 La liste des items disponibles pour le problème du coureur	57
Tableau 4-2 Les objets utilisés Par l'expert pour résoudre le problème du coureur	59
Tableau 4-3 Les actions de résolution utilisées par l'expert pour résoudre le problème du coureur .	60
Tableau 4-4 L'action d'unification utilisée par l'expert pour résoudre le problème du coureur	61
Tableau 5-1 La détermination de EObj3, EObj7 et EObj5 pour le problème du coureur	74
Tableau 5-2 Les objets utilisés par l'apprenant pour résoudre le problème du coureur.....	78
Tableau 5-3 Les actions de résolution utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème du coureur	78
Tableau 5-4 L'action d'unification utilisée par l'apprenant pour résoudre le problème du coureur..	79
Tableau 5-5 La liste des candidats à l'évaluation de la concordance pour le problème de du coureur	79
Tableau 5-6 L'ordre d'établissement des concordances dans le problème du coureur	82
Tableau 7-1 Les items disponibles pour résoudre le problème de l'équation du second degré	95
Tableau 7-2 Les objets utilisés par l'expert pour résoudre le problème de l'équation du second degré	96
Tableau 7-3 Les actions de résolution utilisées par l'expert pour résoudre le problème de l'équation du second degré	97
Tableau 7-4 Les actions d'unification utilisées par l'expert pour résoudre le problème de l'équation du second degré	97
Tableau 7-5 Les conditions utilisées par l'expert pour résoudre le problème de l'équation du second degré	98
Tableau 7-6 La détermination de l'objet EObj5.....	99
Tableau 7-7 La détermination des dépendances lors de la résolution par l'expert du problème de l'équation du second degré	99
Tableau 7-8 La détermination des objets EObj12 et EObj11	100
Tableau 7-9 La détermination des objets EObj13 et EObj14.....	100
Tableau 7-10 Les objets utilisés par l'apprenant pour résoudre le problème de l'équation du second degré	102
Tableau 7-11 Les actions de résolution utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème de l'équation du second degré	102
Tableau 7-12 Les actions d'unification utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème de l'équation du second degré	103

Tableau 7-13 Les conditions utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème de l'équation du second degré	103
Tableau 7-14 Les conditions modifiées lors de l'exécution de la représentation mentale de l'apprenant pour le problème de l'équation du second degré.....	103
Tableau 7-15 Les objets modifiés lors de l'exécution de la représentation mentale de l'apprenant pour le problème de l'équation du second degré.....	104
Tableau 7-16 La liste des candidats à l'évaluation de la concordance pour le problème de l'équation du second degré	105
Tableau 7-17 L'ordre d'établissement des concordances pour le problème de l'équation du second degré	107
Tableau 7-18 Les items disponibles pour résoudre le problème du triangle.....	109
Tableau 7-19 Les objets utilisés par l'expert pour résoudre le problème du triangle	110
Tableau 7-20 Les actions de résolution utilisées par l'expert pour résoudre le problème du triangle.....	110
Tableau 7-21 Les conditions utilisées par l'expert pour résoudre le problème du triangle	110
Tableau 7-22 Les propriétés utilisées par l'expert pour résoudre le problème du triangle	110
Tableau 7-23 La détermination des conditions ECdt1 et ECdt2	111
Tableau 7-24 La détermination des objets EObj5, EObj6 et EObj7	111
Tableau 7-25 Les objets utilisés par l'apprenant pour résoudre le problème du triangle.....	112
Tableau 7-26 Les actions de résolution utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème du triangle.....	112
Tableau 7-27 Les conditions utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème du triangle.....	113
Tableau 7-28 Les propriétés utilisées par l'apprenant pour résoudre le problème du triangle	113
Tableau 7-29 La détermination des conditions ACdt1 et ACdt2	113
Tableau 7-30 La détermination des objets AObj5, AObj6 et AObj7	114
Tableau 7-31 La liste des candidats à l'évaluation de la concordance pour le problème du triangle.....	115
Tableau 7-32 L'ordre d'établissement des concordances pour le problème du triangle	116
Tableau 7-33 La détermination des objets AObj7, AObj2 et AObj4 lors de l'exécution de la représentation mentale erronée de l'apprenant	119
Tableau 7-34 L'ordre d'établissement des concordances pour le problème du coureur (erroné)	122
Tableau 7-35 Les items disponibles pour le problème de thermodynamique	124
Tableau 7-36 Les objets utilisés par l'expert pour résoudre le problème de thermodynamique.....	125
Tableau 7-37 L'action d'unification utilisée par l'expert pour résoudre le problème de thermodynamique	125
Tableau 7-38 Les actions de consultation utilisées par l'expert pour le problème de thermodynamique	125

Tableau 7-39 Les conditions utilisées par l'expert pour résoudre le problème de thermodynamique	126
Tableau 7-40 La propriété utilisée par l'expert pour résoudre le problème de thermodynamique ..	126
Tableau 7-41 Les objets modifiés lors de la résolution du problème de thermodynamique par l'expert.....	126
Tableau 7-42 La condition modifiée lors de la résolution du problème de thermodynamique par l'expert.....	127
Tableau 7-43 Les objets utilisés par l'apprenant pour résoudre le problème de thermodynamique	127
Tableau 7-44 Les actions de consultation utilisées par l'apprenant pour le problème de thermodynamique	127
Tableau 7-45 La condition utilisée par l'apprenant pour résoudre le problème de thermodynamique	128
Tableau 7-46 Les objets modifiés lors de la résolution du problème de thermodynamique par l'apprenant.....	128
Tableau 7-47 La condition modifiée lors de la résolution du problème de thermodynamique par l'apprenant	128
Tableau 7-48 La liste des candidats à l'évaluation de la concordance pour le problème de thermodynamique	129
Tableau 7-49 L'ordre d'établissement des concordances lors de l'évaluation de la concordance pour le problème de thermodynamique	133
Tableau 7-50 L'ordre d'établissement des concordances pour le problème de thermodynamique dans le cas d'une représentation mentale de l'apprenant erronée mais cohérente.....	135

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'avènement des nouvelles technologies de l'information, comme le multimédia et le réseau Internet, rend les logiciels plus attrayants, plus ergonomiques et leurs mises à jour plus rapidement disponibles. En ce qui concerne l'enseignement intelligemment assisté par ordinateur, ces nouvelles technologies contribuent à l'amélioration des logiciels, mais n'apportent pas toutes les solutions aux problèmes que soulève cette discipline. En effet, si l'enseignement est la science de la transmission du savoir, il s'avère que les étudiants n'abordent pas les cours avec les mêmes connaissances, voire les mêmes perceptions, de base. Un des points faibles des logiciels d'enseignement reste la représentation des connaissances à transférer du maître à l'élève. Bien utilisé, l'ordinateur pourrait évaluer l'état des savoirs et des croyances des étudiants, et les amener à la même représentation mentale d'un problème que celle du professeur.

Cette thèse vise à proposer et à programmer un formalisme de représentation des modèles mentaux des novices et des experts en situation de résolution de problèmes et ceci dans le but de comparer leur représentation mentale¹. Cette étude se situe au centre d'une recherche qui doit mener à l'élaboration d'un logiciel d'aide à l'apprentissage basé sur l'analyse des représentations mentales de l'apprenant en situation de résolution de problèmes. Ce logiciel comprend trois parties : la première concerne l'acquisition du modèle mental de l'apprenant ; la seconde consiste à mettre au point, de manière informatique, le formalisme de représentation de ce modèle mental dans le but de comparer ce dernier avec celui de l'expert ; et la troisième concerne l'utilisation des résultats provenant de la comparaison en vue de produire un diagnostic qui aidera l'apprenant à accéder à l'expertise. Chacune de ces trois parties nécessite des investigations d'une grande envergure, c'est pourquoi nous avons commencé par une étude de faisabilité d'un tel projet. Nous nous sommes donc concentrés sur ce qui nous semble être le cœur de ce logiciel : le formalisme

¹ Les termes modèles mentaux et représentations mentales couvrent les mêmes notions et seront donc utilisés indifféremment dans toute la suite de cette thèse.

de représentation et le processus de comparaison des modèles mentaux. Le formalisme de représentation des connaissances est basé sur des techniques d'intelligence artificielle existantes comme les réseaux sémantiques, les cadres conceptuels et les moteurs d'inférences et, également, sur des techniques nouvelles, mises au point spécifiquement pour cette étude. L'originalité de cette thèse réside dans la proposition d'un formalisme de représentation des modèles mentaux des novices et des experts, dans leur comparaison et dans l'implantation informatique de ces modèles. L'intégration de théories issues de la psychologie cognitive à un système tutoriel intelligent (S.T.I.) contribue également à l'aspect novateur de cette thèse.

1.1 L'information et la connaissance

L'information est au coeur de notre société. Au quotidien, nous sommes confrontés à une multitude de renseignements qu'il nous faut traiter et interpréter ; ne serait-ce que ceux que nos sens nous transmettent. La science du traitement de l'information regroupe plusieurs domaines, quasiment autant que le mot information renferme de sens. Toute notre vie, nous devons traiter, sous une forme ou sous une autre, de l'information. Un enfant qui naît ne sait pas encore qu'il va occuper la majeure partie de son temps (celui qui lui reste après avoir mangé, bu et dormi) à analyser tous les signaux qu'il reçoit, pour ainsi bâtir sa connaissance. Plus tard, l'école, l'éducation dispensée par ses parents, seront autant de cadres qui lui apporteront des connaissances et qui l'aideront à les organiser. La connaissance diffère de l'information du fait que la connaissance s'acquiert et est bâtie par chaque individu, contrairement à l'information qui est juste constituée de renseignements exposés [KAMPIS, 1987]. Selon des résultats émanant de la psychologie cognitive, la connaissance ne se bâtit pas *ex nihilo* mais par couches successives, sur des bases existantes, jamais à partir de rien. Un «système», qu'il soit humain ou artificiel n'aura réellement appris que s'il est capable de redire les choses ; pas seulement en répétant par psittacisme, mais aussi en reformulant l'information qui lui a été transmise [BLAIS, 1988]. À cette condition, le «système» aura acquis des connaissances. Si on ne sait pas redire sans répéter, on n'arrive pas à connaître. L'enseignement scolaire a pour but premier de mettre à la disposition d'un apprenant un cadre dans lequel il sera guidé pour gérer les informations qu'il reçoit. L'enseignement est souvent basé sur la répétition mais surtout sur la reformulation, d'où la nécessité d'un langage; sans langage, il ne peut y avoir de connaissances.

Nous appartenons à l'espèce communément appelée *Homo-Sapiens*. Cette appellation transcrit l'idée largement répandue que l'intelligence est la différence majeure entre l'être humain et l'animal. Un des buts de la psychologie cognitive, selon Anderson (1985) est de comprendre la nature de l'intelligence humaine et comment elle fonctionne. Cette volonté de savoir est une motivation importante dans les études en psychologie cognitive, comme dans n'importe quelle science, mais les implications pratiques du domaine constituent une seconde motivation. Si nous comprenons réellement comment on acquiert des connaissances et des aptitudes intellectuelles et aussi comment on tire profit de l'intelligence, alors il nous sera possible d'améliorer l'entraînement intellectuel et les performances en conséquence. Il n'existe pas «d'ordinateur intelligent» capable de résoudre des problèmes, de se rappeler des faits, de raisonner, d'apprendre, de comprendre le langage avec la même facilité qu'a l'être humain. Cette lacune ne provient pas du fait que les ordinateurs sont une création inférieure face à l'être humain mais, simplement, du fait que nous ne savons pas encore comment l'intelligence humaine est organisée. L'intérêt pour la connaissance humaine n'est pas récent, il remonte jusqu'à la Grèce Antique. Platon et Aristote, dans leurs discussions sur la nature et l'origine des connaissances, s'interrogeaient sur la mémoire et la pensée. Des discussions plus récentes confrontent deux écoles de pensées différentes : d'une part, les Empiriques pour qui la connaissance vient avec l'expérience et d'autre part les Nativistes ou Rationalistes pour qui une grande quantité de connaissances est innée. Cela ne fait qu'une centaine d'années que la psychologie cognitive traite la connaissance humaine d'une manière scientifique. Ceci est principalement dû au fait qu'avant le XIX^e siècle, il était inconcevable que des travaux sur l'esprit humain soient dignes d'analyse scientifique.

1.2 Les systèmes tutoriels intelligents

Dans le domaine des systèmes tutoriels intelligents, certains chercheurs dédaignent les systèmes experts à cause de la carence en connaissances implicites de ces derniers. Roger Shank, ardent défenseur de « l'apprentissage en faisant » et fervent opposant aux systèmes tutoriels intelligents lors de la conférence ITS'96, s'est entretenu avec le philosophe Jean-Pierre Dupuy au sujet des systèmes experts pour l'apprentissage [SHANK ET DUPUY, 1995] :

Les premiers pas de l'intelligence artificielle furent guidés par l'hypothèse que les machines devaient imiter le comportement des gens les plus savants. Le problème est que nous ne savons pas comment les gens savent ce qu'ils savent. L'échec des systèmes experts l'a montré : il ne suffit pas de faire entrer un système de règles dans une machine pour lui faire résoudre un problème donné. Plutôt que sur des règles, nous nous appuyons sur des expériences antérieures. Or ces expériences sont pour la plupart inconscientes, et nous ne savons pas comment nous les utilisons. Il existe ainsi une différence essentielle entre connaissance consciente et inconsciente.

...

À une époque où l'ordinateur facilite dans une mesure extrême l'accès à l'information, le savoir explicite cède le pas au savoir implicite, celui-là même que nous ne pouvons exprimer mais qui nous mène au résultat recherché. En démontrant que toutes les informations du monde ne suffiront pas à rendre un ordinateur intelligent, l'intelligence artificielle nous impose cette conclusion : nous savons faire mémoriser, mais nous ne savons pas enseigner.

Cette conclusion n'a rien de très nouveau. Montaigne n'a pas attendu l'arrivée de l'intelligence artificielle pour proposer, dès le XVI^e siècle, qu'il valait mieux avoir une tête bien faite qu'une tête bien pleine ! Encore à l'heure actuelle, personne ne détient le secret de la transmission efficace du savoir, pas plus les machines que les humains ! Quant au prétendu échec des systèmes experts, que doit-on penser alors de la récente victoire de *Big Blue* sur le champion du monde des échecs Gary Kasparov ? De plus, l'ampleur des recherches actuellement menées dans le domaine des systèmes experts en général et des systèmes tutoriels intelligents en particulier tend à prouver que ces techniques sont beaucoup plus prometteuses que ne le laisse entendre M. Shank dans sa « nécrologie » des systèmes experts.

Les S.T.I. sont performants dans la communication de connaissances mais faibles pour amener l'apprenant à acquérir une représentation appropriée de la connaissance. De leur côté, les systèmes basés sur la simulation et la mise en situation sont faibles dans la communication des connaissances mais performants pour amener l'apprenant à acquérir des représentations des connaissances appropriées. Les systèmes basés sur la simulation correspondent à un mode d'apprentissage non sélectif, et conduisent à une structure de la connaissance implicite et procédurale. À l'inverse, les S.T.I. s'apparentent à un mode d'apprentissage sélectif et conduisent à une structure des connaissances explicite et déclarative. Cependant, la simulation ne règle pas tous les problèmes. Nous pensons que la mise en situation de résolution de problèmes est une

approche hybride qui permet un compromis entre la simulation et les S.T.I. C'est donc dans le contexte de la résolution de problèmes que prend place l'étude que nous présentons ici.

1.3 La modélisation des représentations mentales

L'élaboration d'un logiciel d'aide à l'apprentissage passe par une analyse approfondie de chaque étape du processus de résolution de problèmes. Cette analyse conduit à l'élaboration d'outils dont l'expert peut avoir besoin pour résoudre un problème, et ces outils ne devront pas être trop sophistiqués pour permettre à l'apprenant de les utiliser également. De plus, il est primordial d'accéder à la représentation mentale de l'apprenant et non pas simplement à sa réponse, comme le confirme, avec humour, la Figure 1-1.

Notre approche est basée sur la résolution de problèmes mathématiquement et logiquement formalisables, soumis à l'apprenant et préalablement résolus par l'expert. L'énoncé du problème est décrit par l'expert sous la forme d'un texte qui peut être accompagné d'un schéma, comme il est d'usage dans les manuels d'enseignement. L'expert doit décrire sa démarche de résolution en termes d'objets, d'actions et de dépendances. Ces trois types de descriptions permettent de décrire tous les éléments constitutifs du problème qui, une fois assemblés, conduiront à la solution. Ainsi, un objet représentant une variable pourra provenir soit de l'énoncé, soit du déclenchement d'une action. Une action peut être soit une action de résolution, soit une action de consultation d'une table ou d'un abaque, soit une action d'unification. L'action peut être conditionnelle; c'est-à-dire que son déclenchement dépendra de l'état d'une condition ou d'une propriété que l'on regroupe sous le nom de dépendance. Une dépendance porte sur un ou deux objets et son état peut être «vrai», «faux» ou «indéterminé». Ainsi, à l'aide de ces descriptions, les objets, les actions et les dépendances s'imbriquent les unes dans les autres afin de décrire la stratégie de résolution du problème.

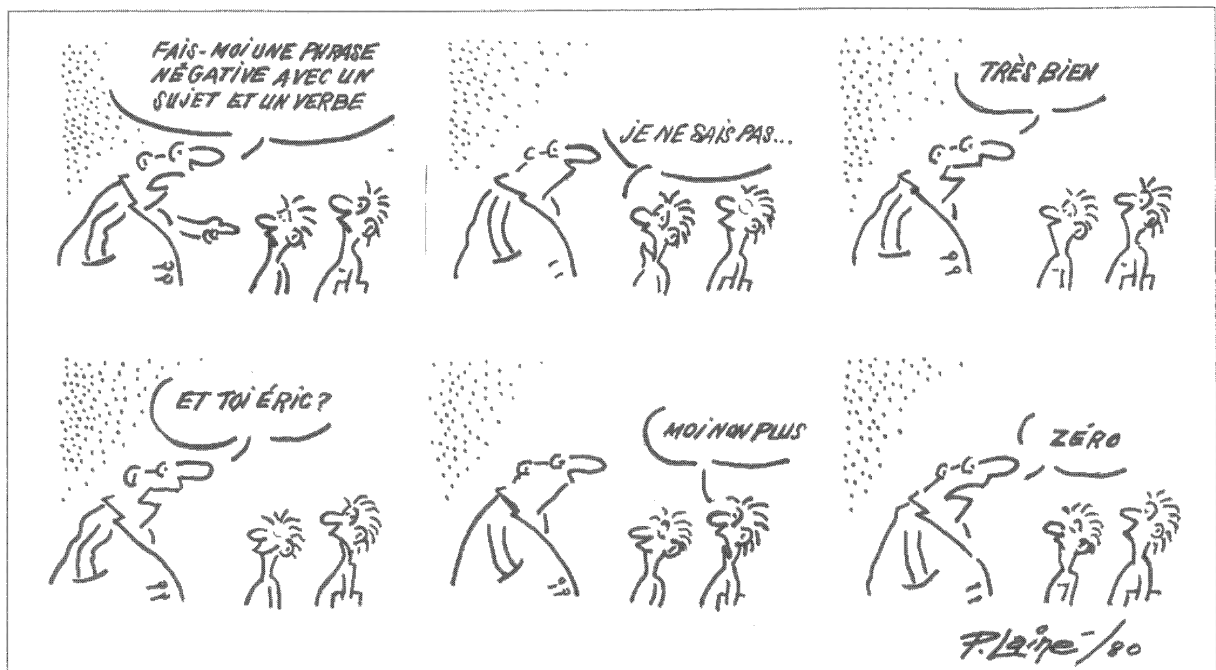


Figure 1-1 L'importance de l'analyse des représentations mentales (Québec français, déc. 1980)

Une fois que les modèles mentaux de l'apprenant et de l'expert sont représentés selon le formalisme, le système tente de valider le modèle mental de l'apprenant par rapport à celui de l'expert. Cette démarche est un processus itératif qui évalue la cohérence du modèle mental de l'apprenant, puis l'exécute et enfin le compare avec celui de l'expert.

Les différents éléments intervenant dans la mise au point et la programmation du formalisme sont présentés dans les chapitres qui suivent. Les chapitres 2 et 3 brossent un portrait des recherches effectuées dans les domaines consacrés aux modèles mentaux d'une part et aux systèmes informatisés de formation d'autre part. Le formalisme est décrit et illustré à l'aide d'un exemple simple au chapitre 4. On y traite en détails les différents types de descriptions qui interviennent dans la résolution d'un problème. Le chapitre 5 présente le processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant par rapport à celle de l'expert. Les trois phases sont détaillées : la cohérence, l'exécution et la concordance. Le prototype que nous avons mis au point pour évaluer le formalisme de représentation et le processus de validation est présenté au chapitre

6. Le chapitre 7 est consacré à l'illustration du formalisme et du processus, à l'aide d'exemples de problèmes à résoudre. Nous terminons en tirant les conclusions de notre étude.

CHAPITRE 2

LES MODÈLES MENTAUX

2.1 Introduction

L'enseignement vise à permettre l'accès au savoir. Afin d'analyser l'évolution du savoir d'un apprenant, il nous semble intéressant de détailler la phase d'apprentissage. Pour cela, trois stades successifs par lesquels passe une personne en cours d'apprentissage seront définis. Il s'agit, dans l'ordre chronologique, du stade de Novice, celui de l'Apprenant et celui de l'Expert². Un des apports importants de la psychologie cognitive à l'apprentissage est la notion de modèles mentaux. Nous nous efforcerons d'éclaircir ce paradigme à la lumière des théories de psychologie cognitive. Enfin, la notion de modèles mentaux nous permettra de mieux différencier ces trois stades de l'évolution de l'apprenant.

2.2 L'historique des modèles mentaux

Dans le cadre de l'évolution des connaissances et de leurs réutilisations, la psychologie cognitive réactualise « un outil » introduit dès 1943 par Kenneth James Williams Craik : Les modèles mentaux. Dans son ouvrage intitulé *The Nature of Explanation*, il définit les principales fonctions du modèle mental de la manière suivante [CRAIK, 1943] (d'après une traduction libre) : « Si une personne possède un modèle d'une réalité externe et des actions possibles qui lui sont propres, même à petite échelle, elle est capable d'essayer diverses alternatives, de conclure laquelle est la meilleure, de réagir à une situation future avant qu'elle ne se présente, d'utiliser la connaissance d'événements passés pour traiter du présent et du futur et de réagir plus sûrement et d'une manière plus compétente aux urgences auxquelles elle a à faire face ». Plus récemment, Brien

2 L'emploi des majuscules permettra de distinguer ces trois stades du sens commun de ces termes : lorsqu'ils sont employés avec des majuscules, ces termes font référence au stade correspondant. Le mot apprenant sans majuscule fait référence à toute personne en situation d'apprentissage, quel que soit le stade de son évolution. Enfin, le mot expert sans majuscule sera utilisé pour signifier un spécialiste d'un domaine donné.

(1994) rappelle « que celui qui agit le fait, dans bien des cas, sur un système ou dans le cadre d'un système, lequel système constitue une composante ou un sous système d'un système plus englobant. La représentation que l'individu se fait des différents états et des diverses transformations qui peuvent survenir dans un système donné constitue le modèle mental qu'il a de ce système [NORMAN, 1983 et 1988, ROGERS et coll., 1992, EHRLICH et coll., 1993, DENHIÈRE et BAUDET, 1992]. Ce modèle mental est formé des connaissances déclaratives et procédurales que l'individu possède sur un système cible. »

Si nous allons consulter un médecin lorsque nous souffrons d'une maladie, c'est bien parce que nous pensons qu'il a un modèle mental du fonctionnement du corps humain que nous n'avons pas. De même, s'il est capable, lorsqu'il nous ausculte, de porter un diagnostic indiquant une maladie plutôt qu'une autre suite à l'observation de symptômes, c'est qu'il a des modèles mentaux des différentes maladies. Enfin, s'il nous prescrit un traitement pour combattre la maladie, c'est selon le modèle mental qu'il a de l'action de ce traitement pour faire disparaître les symptômes. Les modèles mentaux des maladies et des traitements ne sont que des sous-modèles mentaux du modèle mental plus général qui est celui du corps humain.

Notre conception du modèle mental peut être vue comme une représentation temporaire de « scènes » réelles ou hypothétiques, qui contiennent des objets, des personnes et leurs interactions. Un modèle mental est la représentation que l'on se fait d'une chose ou d'une situation et c'est ce modèle mental qui nous guide face à cette situation et dans l'utilisation des choses.

On comprend dès lors le rôle clé que joue un modèle mental dans le traitement de l'information. Mais il n'est pas nécessaire d'avoir des modèles mentaux très raffinés pour pouvoir les utiliser. En effet, une personne peut très bien conduire une voiture et donc avoir un modèle mental de son fonctionnement et de son utilisation sans savoir en construire une. De ce fait, elle ne partage pas le même modèle mental que l'ingénieur ou le garagiste. De même, on voit de plus en plus de gens néophytes en techniques informatiques et en électronique très bien s'en sortir dans l'utilisation de l'ordinateur. Pourtant, ils n'ont pas du tout recours aux mêmes modèles mentaux que les informaticiens et les concepteurs de circuits intégrés lorsqu'ils utilisent un ordinateur. Les

scientifiques de la cognition s'intéressent au problème d'adéquation du modèle mental d'un individu avec la tâche qu'il a à accomplir. La différence entre l'expert et le novice utilisant un système donné, qu'il s'agisse d'un chiffrier électronique ou d'une automobile, dépend du modèle mental que l'un et l'autre possèdent. Le formateur a donc un très grand rôle à jouer afin d'inciter l'apprenant à élaborer des modèles mentaux appropriés, car le choix des stratégies utilisées par la personne dépend des représentations qu'elle se fait de la situation et des actions qu'il est possible de mener dans le cadre de cette situation.

Parmi les nombreuses recherches qui traitent de l'acquisition et de la réutilisation de connaissances, certaines ont recours au concept de modèle mental pour tenter d'expliquer l'apprentissage et le transfert de connaissances. Johnson-Laird (1983) l'utilise pour sa théorie sur le langage et la compréhension de ce dernier. Gentner et Stevens (1983) l'utilisent pour étayer leur théorie sur la compréhension et l'explication des phénomènes physiques. La notion de modèle mental est également utilisée par des chercheurs qui travaillent sur l'interaction homme-machine pour définir aussi bien des modèles d'utilisateurs que des modèles destinés aux utilisateurs [WILSON ET RUTHERFORD, 1989 et 1991].

Les modèles mentaux reflètent la vision que l'on a du monde physique. Les modèles mentaux ne sont pas complets, mais ils peuvent être regroupés et interconnectés ensemble afin d'accroître la précision de notre représentation du monde réel. Les modèles mentaux ne sont pas des événements particuliers comme des épisodes mais plutôt des conclusions partielles basées sur des expériences et des observations passées [ZHENGXIN, 1988].

Selon Norman (1983), les modèles mentaux sont ce que l'on a réellement dans la tête et ce qui nous guident dans l'utilisation des choses. De ce fait, durant l'apprentissage, "les entrées" ne sont plus l'information brute mais son interprétation à travers les modèles mentaux que l'on possède. La connaissance peut être acquise par le biais de ces modèles mentaux et y être intégrée.

Les modèles que l'on possède d'un système dépendent des liens qui nous unissent à ce système. Il faut donc différencier la notion de modèle mental avec celles de modèle conceptuel et de modèle cognitif : le modèle mental est la représentation que possède un individu quelconque du système

(pas forcément la bonne), le modèle conceptuel est la représentation qu'ont les concepteurs et les spécialistes du système et le modèle cognitif représente la démarche qu'utilise quelqu'un qui réalise une tâche impliquant le système [STAGGERS ET NORCIO, 1993].

2.3 Les différences de modèles mentaux entre les Novices et les Experts

L'analyse des modèles mentaux permet de mieux cerner l'évolution qui a lieu chez un apprenant. Lors de l'apprentissage, l'apprenant passe par trois stades successifs qu'il convient de bien différencier. L'apprenant est tout d'abord Novice, c'est son statut lorsque débute l'enseignement. Finalement et idéalement, lorsque les buts poursuivis par l'enseignement sont atteints, il est Expert. Durant toute la période d'apprentissage, qui s'étend du stade de Novice à celui d'Expert, il est Apprenant³.

Tout au long de notre vie, nous changeons continuellement d'état cognitif (relatif à l'organisation et à la description des connaissances) et ceci de manière inconsciente. Suivant la situation à laquelle nous sommes confrontés, nous coiffons soit la casquette du Novice, soit celle de l'Apprenant, ou peut-être même celle de l'Expert. C'est la quantité et l'organisation de nos connaissances pour un domaine donné qui décident du couvre-chef qui nous coiffe. Ainsi par exemple, un enfant sera Novice puis Apprenant concernant les propriétés du triangle; pendant le même temps, il peut être Expert dans le domaine d'un jeu vidéo et Novice au sujet de la disparition des baleines à bosse. Plus tard, il pourra être Expert pour la fonction qu'il exerce dans son emploi bien qu'étant Novice lors de ses premiers cours de golf et Apprenant en ce qui concerne la politique extérieure du Canada. Le flot d'informations dans lequel nous baignons au quotidien agit directement sur les représentations mentales que nous construisons. Ces représentations mentales, également appelées modèles mentaux, reflètent la vision que l'on a du

³ Cette phase peut être vue comme le franchissement d'une succession de « zones de développement proximal ». Le psychologue Vygotsky définit la « zone de développement proximal » comme étant l'espace séparant le niveau de développement actuel du sujet, qui est déterminé par sa capacité à résoudre seul un problème, et le niveau de développement potentiel du sujet qui, lui, est déterminé par sa capacité à résoudre un problème avec le support ou la collaboration d'un pair plus compétent que lui [VYGOTSKY, 1978 p. 86 ; d'après une adaptation libre].

monde physique. Ce sont elles qui nous guident dans l'utilisation des choses. Leur continuelle évolution et leur enrichissement déterminent la couleur de notre casquette tout au long de l'apprentissage.

Mais qu'entend-on par expert ? Est-ce quelqu'un qui sait résoudre tous les problèmes ayant une solution ou bien quelqu'un qui a une représentation correcte et riche du domaine, pouvant être complétée par de nouvelles théories et de nouvelles découvertes ? La seconde option nous semble la plus appropriée, car elle fait de l'expert quelqu'un pouvant faire évoluer ses connaissances sans bouleverser ce qui est déjà acquis, alors que la première option décrit l'expert comme une encyclopédie avec un « super index » pour un accès « ultra rapide ». Par exemple, la différence entre la mécanique classique et la relativité bouleverse les croyances des novices : en mécanique classique, une accélération constante signifie une augmentation de la vitesse mais, en relativité, la vitesse ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière. Cela perturbe le novice alors que l'expert est capable d'utiliser conjointement ces deux notions [SMITH ET GOOD, 1984].

Les notions de Novice et d'Expert sont souvent différenciées dans la littérature d'une manière uniforme et basées sur la quantité ainsi que sur la qualité des connaissances. Selon la classification d'Anderson et coll. (1990), pionnier dans le domaine, les connaissances sont séparées en trois types : les connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles. Les connaissances déclaratives sont distinguées par le fait que l'être humain peut les coder rapidement et sans aucun ajout supplémentaire sur la façon dont elles seront utilisées ; c'est ce qui est déposé en mémoire quand on apprend quelque chose, lors d'un enseignement formel par exemple, ou de la lecture d'un texte. Les connaissances procédurales, par contre, ne peuvent être acquises qu'à travers l'utilisation des connaissances déclaratives, la plupart du temps à la suite d'expériences menées par essais-erreurs ; il s'agit de connaissances hautement efficaces et à usage spécifique. Enfin, il y a les connaissances conditionnelles qui sont les connaissances du transfert de l'apprentissage ; ce sont elles qui créent l'expertise. Les connaissances procédurales correspondent à des séquences d'actions alors que les connaissances conditionnelles correspondent essentiellement à des classifications et à des catégorisations. Tardif présente quelques exemples de telles connaissances conditionnelles : savoir distinguer un carré d'un rectangle, reconnaître un participe passé dans une phrase, reconnaître les provinces maritimes sur

une carte du Canada, reconnaître dans une série de problèmes ceux qui exigent une soustraction, estimer l'exactitude d'une réponse en mathématique, etc. [TARDIF, 1992]. Certains chercheurs classent les différentes catégories de connaissances en « savoir-quoi », « savoir-comment » et « savoir-quand ». Pour les auteurs qui favorisent l'approche par compétences, la distinction s'effectue autrement et les catégories sont le « savoir », le « savoir-faire » et le « savoir-être ». Il arrive également d'entendre parler de « compétences », « d'habiletés » et « d'attitudes ». La distinction entre des types de connaissances semble donc perdre un peu de sa pertinence.

Ces classifications sont discutables, comme le signale Désilets (1997). Il n'est pas toujours évident de déterminer le type auquel se rapporte une connaissance : En effet, on pourrait s'entendre pour classer les règles d'accord des participes passés dans la catégorie des connaissances procédurales. Mais, si un élève connaît une règle d'accord d'un participe passé sans savoir l'appliquer au moment opportun, on peut dire qu'il possède la connaissance sous sa forme déclarative. La règle est une connaissance déclarative, l'application de la règle est une connaissance procédurale. Mais, pour appliquer la règle, il faut reconnaître la présence d'un participe passé, cette connaissance est du type conditionnel. De tels énoncés sont difficilement classables, il en va de même des règles de calcul sur les fractions par exemple et de tout autre énoncé complexe.

De façon générale, les Novices possèdent essentiellement des connaissances déclaratives. Elles sont très peu reliées entre elles et pas hiérarchisées. Les connaissances procédurales et conditionnelles ne sont pas automatisées, entraînant ainsi une augmentation de la charge mentale du novice. Les connaissances du novice sont entassées sans aucun classement. Son modèle mental s'apparente à un tas dans lequel le Novice doit fouiller pour accéder à la connaissance recherchée [LARKIN ET COLL., 1980].

Les Experts possèdent une plus grande quantité de connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles. Ces connaissances s'organisent autour de liens sémantiques, de manière hiérarchique. Les procédures des Experts sont automatisées, ce qui réduit considérablement la charge mentale et l'occupation de leur mémoire de travail. Le modèle mental de l'Expert s'apparente à un dictionnaire, les connaissances sont rapidement accessibles et sont classées par

catégories. Deux approches de différenciation des concepts de Novice et d'Expert peuvent être distinguées. Une première conception, qualifiée de simpliste, assimile le Novice à celui qui ne sait rien et qui apprend. L'expert est celui qui sait et qui transmet son savoir. L'expert qui instruit un novice, s'apparente à quelqu'un qui remplit une page blanche, ou à quelqu'un qui bâtit un édifice sur un terrain vierge. C'est souvent faux, l'enseignant part rarement sur des bases neutres [MESTRE ET TOUGER, 1989]. Le Novice a des idées parfois fausses, qu'il tient de sa vie de tous les jours ; par exemple, en physique, il confond facilement vitesse et accélération, ou encore masse et poids [CHAMPAGNE ET COLL., 1992]. La seconde, dite plus réaliste, distingue deux types de différences entre les Novices et les Experts [VANLHEN, 1988] : les notions manquantes (i.e. des notions qu'a l'Expert et que n'a pas le Novice) et les mauvaises notions, aussi appelées conceptions erronées (i.e. des notions qu'a le Novice mais que n'a pas l'Expert). Cette seconde approche nous invite à ne plus considérer la connaissance du Novice comme un sous-ensemble de la connaissance de l'Expert. La Figure 2-1 illustre, dans l'espace des connaissances, la distinction suggérée par ces deux conceptions.

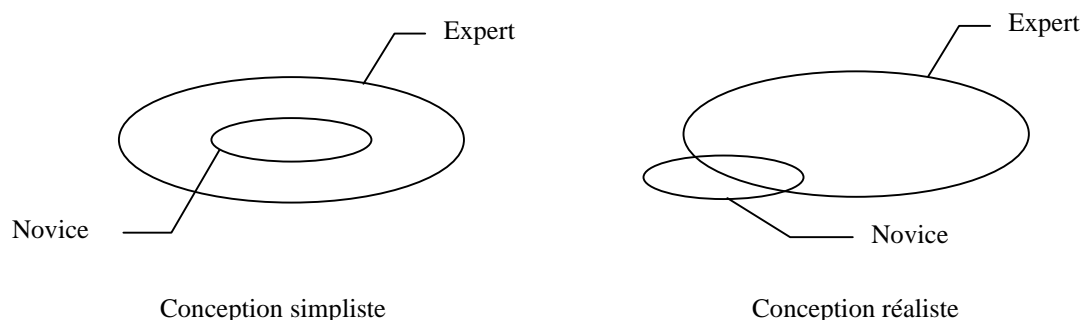


Figure 2-1 La distinction entre novice et expert selon deux conceptions

Un exemple de mauvaise notion est donné par la Machine d'Atwood présentée à la Figure 2-2 [MESTRE et TOUGER, 1989]. La machine d'Atwood est constituée de deux blocs de même masse reliés entre eux par une corde entourant une poulie. On pose comme question à un Novice « Quel est le bloc le plus lourd ? », en lui présentant le dessin correspondant à la première question. De nombreux Novices répondent: « Le bloc B, car il est situé plus bas. » Ceci correspond à une conception erronée qui suppose que le bloc le plus bas est le plus lourd. Pour leur faire prendre conscience de cette mauvaise représentation, le bloc A est descendu plus bas que le bloc B. La

question est réitérée en présentant le dessin correspondant à la deuxième question. Là, le Novice prend conscience de sa mauvaise représentation, car ce n'est pas le fait d'avoir descendu un bloc qui a modifié le poids des objets.

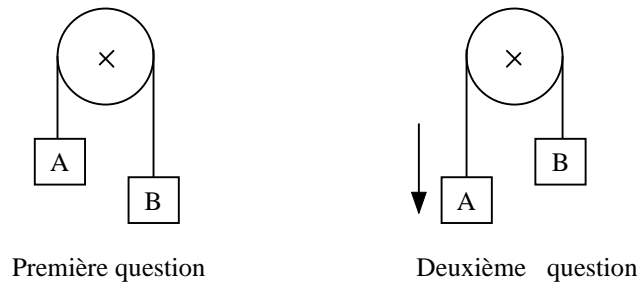


Figure 2-2 La machine d'Atwood, comme exemple de mauvaise représentation mentale

Dans le souci de rendre compte de ces distinctions, croyance et connaissance sont différenciées. La connaissance s'applique au niveau de l'Expert. Ce qu'il sait, ce qu'il « connaît » s'intègre dans son modèle mental et s'accorde avec les principes relatifs aux « bons » modèles mentaux. Pour le Novice, il s'agit plus communément de croyances ; il est sûr que pour lui, ses croyances sont aussi fortes que les connaissances de l'Expert. Mais à un niveau d'expertise supérieur, les croyances du Novice ont une base faible et sont présentes de manière isolée. Nombreuses sont ces croyances qui devront disparaître pendant la phase de l'apprentissage correspondant au stade Apprenant pour pouvoir accéder au statut d'Expert. D'autres devront être consolidées et trouver une explication.

D'une manière générale, un « bon » modèle mental doit remplir certaines conditions [HANISCH et coll., 1991] :

1. la cohérence interne : il n'existe pas de contradiction à l'intérieur du modèle ; c'est clair dans l'esprit ;
2. la validité : le modèle correspond à la réalité de ce qu'il représente ;
3. l'intégration : le modèle s'accorde avec les autres connaissances.

Ces conditions sont reprises comme balises dans le processus de validation du modèle mental de l'apprenant présenté au chapitre 5.

Une bonne méthode pour tester le modèle mental d'un Apprenant au cours de l'apprentissage, consiste à lui faire réaliser une tâche nouvelle pour lui, faisant intervenir une succession d'éléments de base lui ayant été enseignés indépendamment (*Far Transfer Task*) [SEIN ET BOSTROM, 1989].

Delacôte (1996) reprend la distinction entre les schèmes des novices et des experts présentés par Bruer (1993). Les schèmes sont des structures associatives, présentes dans la mémoire déclarative. Ils s'apparentent à des réseaux reliant les connaissances et les croyances que nous avons des objets, des événements, des situations, des concepts ou encore des lois. Toutes nouvelles notions relatives à un schème préexistant vient s'y greffer. Cette notion de schème est très proche de ce que nous avons défini comme étant un modèle mental. Delacôte reprend la distinction présentée par Bruer au sujet des schèmes relatifs à l'idée que se font un novice et un expert de la notion de plan incliné dans un problème de physique comme celui présenté à la Figure 2-3

La Figure 2-4 présente un exemple de perception de ce problème par un Novice. Cette perception est essentiellement en surface : les concepts ont un faible degré de connexion entre eux. On y retrouve uniquement des connaissances déclaratives et aucune connaissance procédurale ni conditionnelle. La perception de l'Expert, présentée à la Figure 2-5, est plus profonde : les concepts sont beaucoup plus détaillés sous forme d'agrégats et elle intègre les trois types de connaissances. Comme connaissances procédurales, on retrouve les lois de Newton, qui sont distinguées suivant une connaissance conditionnelle relative à l'accélération et à l'équilibre.

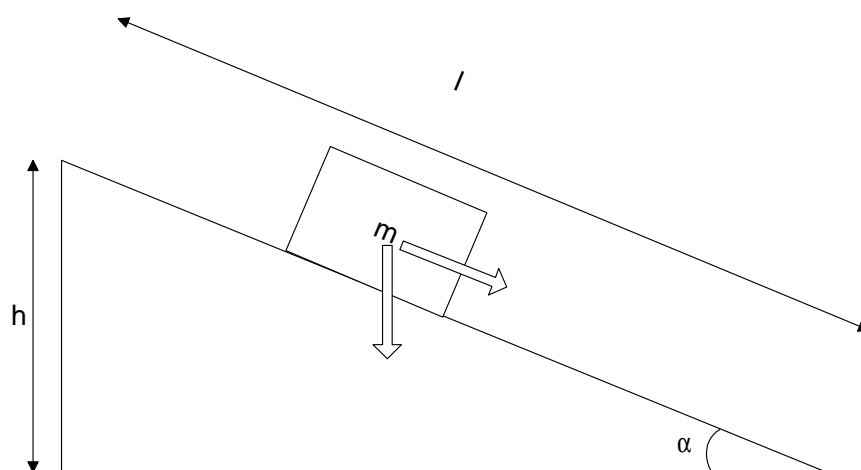


Figure 2-3 Un problème de plan incliné

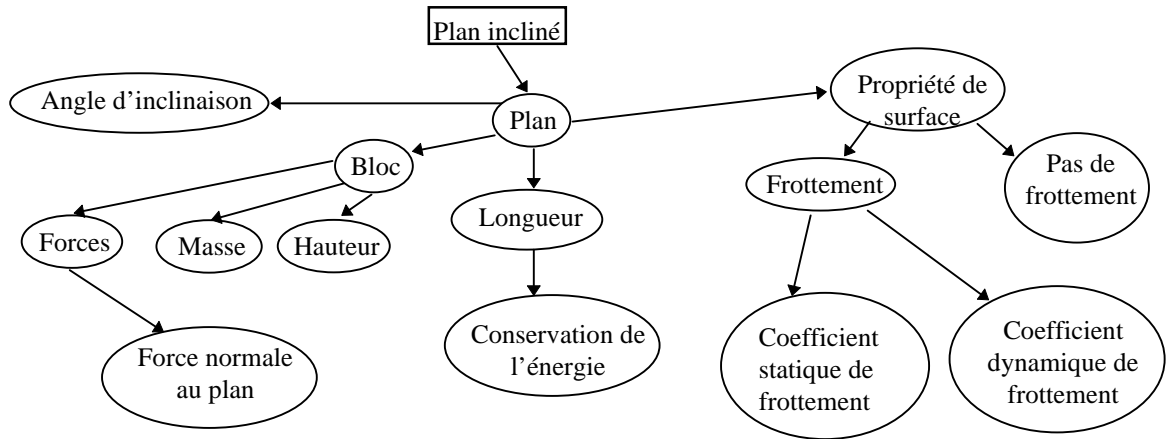


Figure 2-4 Un exemple de modèle mental d'un novice

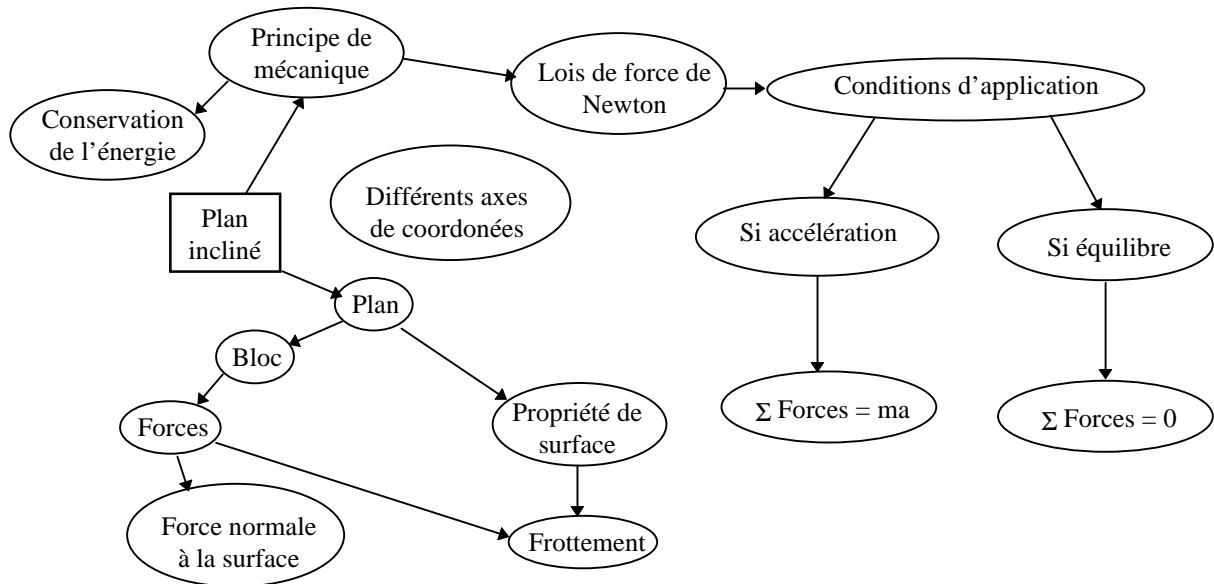


Figure 2-5 Un exemple de modèle mental d'un expert

Lorsque le concept de modèle mental est utilisé, il faut garder à l'esprit quatre points essentiels [PAYNE, 1991]:

1. Le comportement est dicté par des croyances et/ou des connaissances.
2. La simulation mentale permet de faire des inférences et de tirer des conclusions.
3. Les modèles mentaux sont des représentations par analogie.
4. Ils sont basés sur l'expérience.

Ces points sont repris dans le formalisme que nous avons élaboré : le premier point est traduit par le fait que l'on se base sur la représentation mentale de l'apprenant ; la partie exécution de la représentation mentale de l'apprenant lors du processus de validation s'apparente au deuxième point. Le troisième n'est pas directement exploitable du fait de son caractère moins formel. Enfin le quatrième point se retrouve dans notre approche qui s'intègre dans une activité de résolution de problèmes.

Nous avons précisé précédemment que, selon nous, la représentation mentale et le modèle mental couvrent la même notion. Par contre, nous proposons de distinguer le modèle mental de la représentation des connaissances. Une personne peut avoir un modèle mental de quelque chose sans avoir de connaissances s'y rapportant. Les préjugés sont un bon exemple qui illustre cette distinction. Notre éducation nous amène à avoir une certaine perception des choses, à établir des relations de cause à effet, pas toujours justifiées. Nous possédons des modèles mentaux de tout, ou presque, sans pour autant avoir des connaissances sur tout. Attribuer une signification à un mot relève du modèle mental, parce qu'au mot sont attachées de nombreuses associations qui peuvent être des images, des situations vécues, des synonymes, eux mêmes impliquant d'autres associations. Un étudiant qui débute un cours (i.e. qui s'apprête à quitter le stade de Novice) n'a pas forcément de connaissances dans le domaine. Par contre, il a un modèle mental d'au moins une partie du domaine dû à sa propre expérience, à son éducation et au sens commun. En physique, on⁴ sait qu'une balle rebondit ; en thermodynamique, on sait qu'il fait froid dans un réfrigérateur, qu'une tasse de café refroidit. Le Novice n'a souvent pas d'autre recours pour

4 Dans cette phrase, l'emploi du "on" fait référence au sens commun.

argumenter ses croyances que de dire: « c'est comme ça, je le sais... ». De son côté, l'Expert aura recours à une théorie scientifique qui étayera son savoir.

L'accès d'un Novice au stade d'Expert se fait de manière progressive, il s'agit de la phase Apprenant de l'apprentissage. Elle est simple à définir, mais beaucoup plus complexe à analyser quant aux modifications qui s'effectuent au sein du modèle mental de l'apprenant. Le statut d'Apprenant est la phase par laquelle passe l'apprenant à partir du moment où il quitte le statut de Novice (i.e. dès qu'il débute l'apprentissage d'un domaine) jusqu'à ce qu'il atteigne le statut d'Expert (i.e. son savoir dans le domaine a atteint un niveau préétabli aussi bien en terme de quantité de connaissances qu'en degré d'élaboration de celles-ci : organisation, hiérarchie, automatisation des tâches et recours à des stratégies cognitives et métacognitives). Dans le contexte de l'enseignement, les modèles mentaux relatifs aux trois stades peuvent être définis. Le modèle mental de l'Expert peut être défini à priori, il fait partie des buts fixés par l'enseignement. C'est à ce degré d'élaboration des connaissances que le Novice doit être mené. Le modèle mental du Novice doit être une représentation la plus fidèle possible de l'état des connaissances et des croyances avec lesquelles une personne aborde l'apprentissage. Quant à l'Apprenant, son modèle mental devra être en perpétuel façonnement afin d'ancrer et stabiliser ses croyances fondées. Ceci est rendu possible par l'apport de bases et de liens qui lui permettent d'asseoir sa connaissance, de lui faire prendre conscience de la nécessité de rejeter certaines de ses croyances qui ne s'appliquent pas, et enfin d'étoffer son savoir à l'aide de nouvelles connaissances. Ces nouvelles connaissances peuvent être déclaratives, procédurales ou conditionnelles mais également des connaissances relatives à l'apprentissage proprement dit, que l'on peut nommer métacognitives, dans le but de pouvoir apprendre par lui-même et d'autoréguler ses apprentissages. Nous proposons la Figure 2-6 comme vue schématique de l'apprentissage en tant que raffinement du modèle mental de l'apprenant. Le Novice représente l'état de départ du processus d'apprentissage, l'Expert l'état final et l'Apprenant la phase intermédiaire.

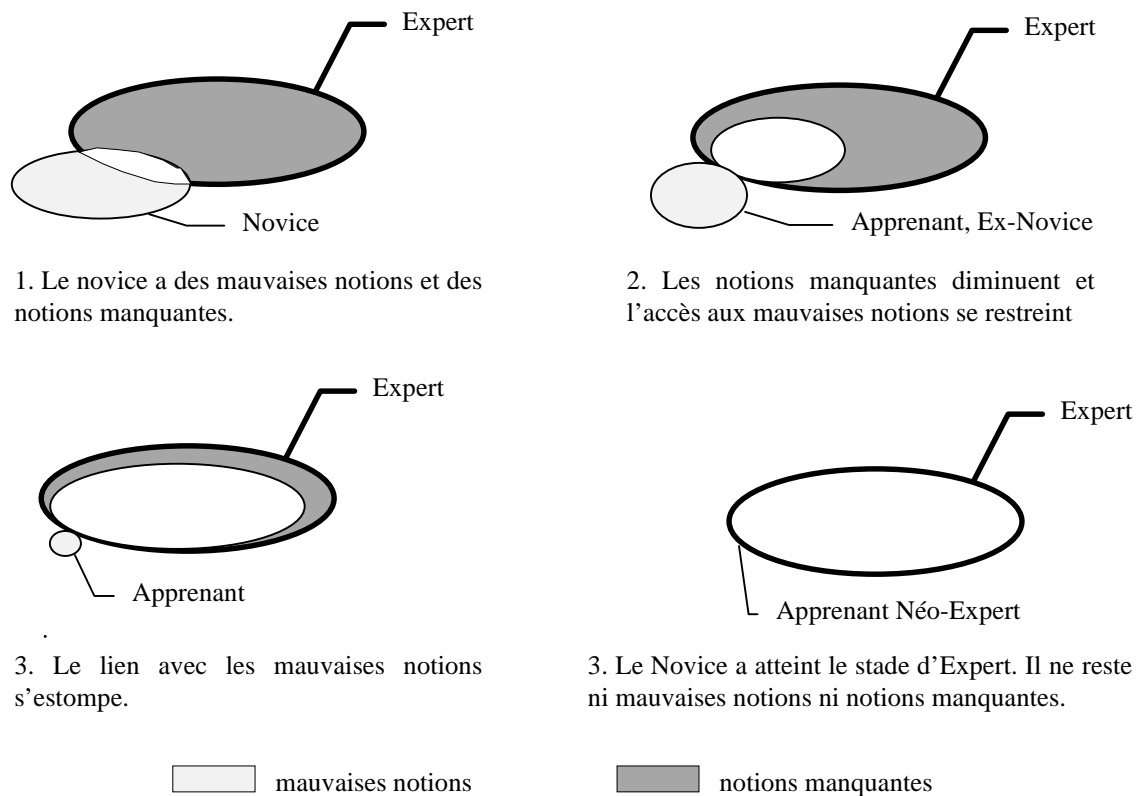


Figure 2-6 L'évolution des connaissances au cours de l'apprentissage

Un moyen couramment utilisé pour différencier les Apprenants des Experts est de les mettre en situation de résolution de problèmes. Lorsqu'il est demandé à des Apprenants débutants et à des Experts de classer des énoncés de problèmes, l'étude des réponses met en évidence la différence de la structure de leurs modèles mentaux. Comme le montrent des études faites dans le domaine de la physique [CHI ET COLL., 1981], et de la chimie [CAMACHO ET GOOD, 1989], les Apprenants débutants trient les problèmes à l'aide d'informations superficielles (ils regroupent les problèmes qui traitent de plans inclinés, ceux qui traitent de poulies, etc.), alors que les Experts regroupent les problèmes selon le phénomène physique sous-jacent servant à la résolution (Théorème de l'énergie cinétique, Relation Fondamentale de la Dynamique, Conservation de la quantité de mouvement, etc.). Cette distinction apparaît très clairement dans l'ouvrage de Bruer (1993) et également dans l'article de Johnson (1989). Elle résulte directement de l'organisation des connaissances et donc du modèle mental. Au moment de la lecture d'un énoncé, l'Expert et le Novice se comportent différemment par le fait qu'ils n'ont pas le même but. Pour l'Apprenant

(Ex-Novice), il faut chercher l'information sur l'algorithme à utiliser pour mener à bien la résolution du problème. Pour l'Expert par contre, il s'agit de chercher à percevoir l'essence du problème.

En situation de résolution de problèmes, c'est encore cette distinction dans la structure des modèles mentaux qui conduit les Apprenants et les Experts à agir différemment. L'automatisation des connaissances procédurales et conditionnelles de l'expert conduit souvent ce dernier directement et rapidement à une analyse qualitative du problème et ainsi, la résolution quantitative n'est plus qu'un exercice mathématique. S'il ne possède pas d'heuristiques applicables dans le cas donné, il ramènera le problème à ses principes de base et sera ainsi capable d'élaborer une stratégie pour le résoudre. À l'opposé, l'Apprenant cherche l'équation qu'il connaît reliant l'inconnue avec les données dont il dispose ; pour cela, il balaye sa liste de connaissances. Sa démarche est une suite d'essais-erreurs qu'il espère voir aboutir à essai-réussite sur une des équations qu'il connaît. Il arrive même qu'il n'ait pas plus de conviction dans l'utilisation d'une équation plutôt que celle d'une autre. Sa charge mentale s'en trouve d'autant plus importante qu'il doit considérer tout ce qu'il sait. L'Expert a naturellement écarté ce qui n'avait pas de rapport avec le problème du fait de l'organisation de son savoir [MILECH et coll., 1993]. Par exemple, un Expert en dessin assisté par ordinateur utilise les fonctions de projection et de symétrie, alors qu'un novice débutant reproduit plusieurs fois le même objet. L'expert a une approche orientée vers les fonctions, alors que le débutant a une approche orientée vers les objets [EBERTS et coll., 1987]. L'Expert a tendance à choisir une stratégie de résolution et à la suivre en l'optimisant. Le débutant essaye plusieurs stratégies superficiellement. Dans le cas de problèmes ouverts, c'est-à-dire des problèmes pour lesquels la solution n'est pas connue de la part de l'Expert (problème de conceptions, d'économie, de développement, d'environnement, etc.), si la complexité augmente, les performances des Experts et des Novices sont comparables, parfois même inversées [REITHER, 1981].

2.4 Les protocoles de recherche pour établir les modèles mentaux

2.4.1 Une démarche générale décomposée en quatre étapes

Toutes ces considérations sur les modèles mentaux ne resteront qu'au stade théorique si le problème d'extraction des connaissances n'est pas résolu : comment accéder à la représentation mentale d'une personne ? Dans la littérature, cette question est souvent nommée le goulot d'étranglement de la réalisation de systèmes experts. Cette mise en évidence du modèle mental est primordiale pour savoir de quoi il est constitué, comment il évolue, de quelle façon il peut être identifié et représenté ainsi que son rapprochement avec le comportement cognitif du sujet. La même procédure se retrouve couramment dans les études effectuées dans ce domaine [COLLINS et GENTNER, 1987 ; PAYNE, 1988 et 1991 ; KETSHER, 1992] ; elle se décompose en quatre étapes principales : l'identification des sujets visés, le choix d'une méthode d'extraction, l'extraction en elle-même et l'analyse des résultats collectés. Les choix effectués lors de chaque étape déterminent un protocole d'établissement des modèles mentaux adapté à l'étude entreprise.

2.4.2 La détermination d'un protocole approprié

Le choix de l'échantillon à analyser dépend directement du degré d'expertise à étudier : le stade Novice, Apprenant ou Expert. L'analyse devra être menée sur une population en nombre raisonnable afin de disposer de résultats représentatifs sans que la collecte des données ne devienne une tâche trop fastidieuse. Il est important que les sujets soient volontaires et intéressés par cette étude. La participation est souvent accompagnée d'une rémunération. En ce qui concerne la méthode d'extraction des connaissances, les interrogations orales ou écrites, la mise en situation de résolution de problèmes et les séances d'associations d'idées ou d'établissement de réseaux sémantiques constituent les principales approches utilisées. Ce sont des méthodes exploratoires et inductives.

Les interrogations sont constituées d'une succession de questions soumises aux sujets et auxquelles ceux-ci doivent répondre. Elles peuvent prendre deux formes : orales ou écrites. L'analyse des réponses collectées à partir de plusieurs sujets permet de faire apparaître des constantes dans les connaissances et leur représentation. La forme écrite paraît moins fructueuse

que la forme orale. À l'aide de la forme écrite, l'étude peut être menée sur un plus grand échantillon car elle prend moins de temps que la méthode orale mais l'analyse ne peut être menée que sur la réponse donnée à la question posée et non sur le processus d'accession à cette réponse. La lecture de l'énoncé d'une question ultérieure peut influencer la réponse à la question courante. Une fois le questionnaire distribué, plus aucune action n'est possible sur la formulation et le choix des questions. La personnalisation et l'adaptation au sujet de l'interrogation sont exclues de cette méthode.

La forme orale semble combler ces lacunes. Il s'agit plus d'une entrevue que d'un interrogatoire. Un «animateur» pose les questions de type question ouverte, le sujet répond, ce dernier peut interagir avec l'animateur, ce qui n'est pas possible dans la forme écrite. Le sujet peut poser des questions à son tour pour éclaircir la question. L'animateur pourra analyser le cheminement du sujet, il pourra orienter l'entrevue en fonction du sujet auquel il fait face ; modifier les questions, en choisir une plutôt qu'une autre, changer la forme de la question, chercher à éclaircir un point qu'il a relevé dans une réponse. L'entrevue n'aura donc pas la même forme d'un sujet à l'autre. Il est possible d'approfondir beaucoup plus la manière dont le sujet se représente un domaine par la forme orale que par la forme écrite. L'animateur doit bien choisir ses interventions afin de ne pas influencer les réponses du sujet.

La mise en situation de résolution de problèmes constitue une seconde méthode permettant d'accéder à la connaissance contenue dans les modèles mentaux d'une personne. Le sujet est confronté à la résolution d'une tâche faisant appel à ses connaissances dans le domaine étudié. Un problème dans lequel la difficulté va en augmentant permettra de situer le niveau d'expertise du sujet. Ce dernier est invité à raisonner à haute voix afin qu'il soit possible de suivre le cheminement de son raisonnement et les associations et implications auxquelles il a recours. Il est intéressant de laisser aller le sujet dans sa démarche, de l'enregistrer et de procéder à une analyse ultérieure de son comportement. Ainsi le contenu et la structure de ses connaissances apparaîtront avec un minimum d'influence extérieure pouvant les modifier. Suivant les domaines, il peut s'agir à proprement parler de résolution de problèmes, ou alors d'étude de cas et de mise en situation. L'énoncé des problèmes peut être de la forme: « Que se passe-t-il quand... », « Comment faire pour... », « Pourquoi... », etc. Cette manière de procéder se rapproche de

l'entrevue orale, bien qu'elle soit plus ciblée sur la réalisation d'une tâche. Payne l'utilise pour accéder à la représentation mentale de personnes à propos des guichets bancaires automatiques [PAYNE, 1991]. C'est cette méthode que nous avons mise en œuvre lors d'une étude parallèle visant à identifier les connaissances préalables avec lesquelles des étudiants abordaient un cours de thermodynamique au niveau universitaire. Les limitations des protocoles de pensée à voix haute sont détaillées dans les travaux de Dionne (1996).

La troisième méthode s'oriente davantage vers une étude des associations de concepts et de regroupements des connaissances. Il est demandé au sujet de regrouper des concepts ou des termes par rapport à leur degré de similitude et de dépendance. Les moyens pratiques pour mettre en œuvre cette méthode peuvent être de faire tracer des réseaux sémantiques, de trier des cartes sur lesquelles apparaissent les divers concepts ou énoncés de problèmes. C'est le sujet qui doit faire l'effort d'ordonner sa connaissance. Ce type de tâche est difficilement réalisable de la part de Novices du fait du peu de liens unissant ses connaissances.

Une fois que la forme de la méthode d'extraction a été choisie, il reste à déterminer son contenu. Cette étape dépend essentiellement du domaine d'étude. Il faut choisir les questions ou déterminer les problèmes susceptibles de faire ressortir la structure de la connaissance. Cette étape doit être menée conjointement entre un spécialiste de la connaissance et un spécialiste du domaine.

L'analyse des résultats collectés prend une forme qui est étroitement liée à la méthode d'extraction choisie. Dans les questionnaires écrits, le dépouillement, le regroupement et le classement des réponses peuvent aboutir à une analyse statistique permettant de souligner les principales composantes de la connaissance et la constitution des modèles mentaux. Les entrevues orales et la mise en situation de résolution de problèmes pourront être traitées de la même manière, souvent à partir d'enregistrements sonores et/ou vidéos des séances. Il s'agira d'une analyse au cas par cas, permettant de mettre en relief les tendances dominantes. Pour les techniques dites associatives, l'étude des résultats peut être faite en ayant recours à des outils mathématiques comme l'analyse multidimensionnelle [HANISCH ET COLL., 1991].

2.5 L'enseignement est la science de la construction du savoir

L'influence de la psychologie cognitive sur les conceptions et les pratiques de l'enseignement ne cesse d'augmenter depuis les quinze dernières années. En effet, les recherches en psychologie cognitive apportent des conclusions qui ont une importance majeure et une application directe à l'apprentissage et à l'enseignement. Elle pose comme postulat de base que « le comportement est causé par une activité interne mettant en jeu des réalités internes : les représentations » [DENHIÈRE et BAUDET, 1992]. Les psychologues cognitivistes se sont fixé comme but de construire des modèles rendant compte de ces représentations mentales. La psychologie cognitive analyse les structures de connaissances et les processus auxquels a recours l'apprenant pour effectuer ses apprentissages. À partir de ces analyses, elle élabore des modèles, souvent inspirés des théories du traitement de l'information, qui simulent le déroulement cognitif de l'individu en train d'effectuer une tâche. Ces modèles ont des retombées dans les domaines de l'enseignement et de l'apprentissage.

Dans ce contexte, il faut considérer l'enseignement comme la science de la construction du savoir [TARDIF, 1992]. La psychologie cognitive est la seule science à étudier, de manière complète l'apprentissage, c'est-à-dire l'acquisition, l'intégration et la réutilisation des connaissances. Son principal pôle d'intérêt est le traitement de l'information et l'apprentissage est un excellent domaine d'application des processus de traitement de l'information.

2.6 La mise en situation de résolution de problèmes

Selon Tardif (1992), lorsque l'on observe un individu en situation de résolution de problèmes, il semble possible de comprendre, de suivre, et finalement de modéliser les processus cognitifs auxquels celui-ci a recours. Cela permet également d'analyser les mécanismes de transfert des connaissances d'une situation-problème à une autre. Les comparaisons effectuées entre sujets experts et sujets novices mettent en évidence les caractéristiques des uns et des autres en regard de leurs connaissances, des processus et des stratégies auxquels ils ont recours. Les activités de résolution de problèmes sont considérées comme « les activités les plus susceptibles de produire des apprentissages significatifs et permanents chez l'élève, de provoquer et de soutenir le transfert » [TARDIF, 1992 et 1996]. L'auteur définit ainsi la situation de résolution de problèmes:

« un problème à résoudre existe lorsqu'une personne poursuit un but dans une activité et qu'elle ne peut pas reconnaître d'emblée le scénario de résolution lui permettant d'atteindre ce but. » Il énonce ensuite les deux phases cruciales sur lesquelles doit reposer une situation d'enseignement et d'apprentissage :

la phase de représentation du problème qui comprend :

- la reconnaissance du problème ;
- la description du problème ;
- l'analyse du problème.

la phase de solution du problème qui comprend :

- la génération d'un scénario de résolution ;
- l'évaluation de l'efficacité des solutions privilégiées ;
- la mise en application de la solution retenue ;
- la mise en application de nouvelles solutions au besoin.

2.7 L'évolution du modèle mental

Selon les théories de psychologie cognitive, le modèle mental est la plate-forme sur laquelle opère l'apprentissage. Une théorie de l'apprentissage, le Constructivisme, suggère de bien distinguer l'information et la connaissance [BLAIS, 1988] : l'information peut être donnée ou transmise facilement en l'énonçant, alors que la connaissance est quelque chose que chaque individu voulant apprendre doit bâtir pour lui-même et par lui-même. Selon l'auteur, l'instruction conventionnelle dans les domaines scientifiques encourage les méthodes algorithmiques, plutôt que la perception de l'essence des phénomènes. L'instruction conventionnelle échoue non pas parce qu'elle est mal exécutée mais à cause de son contenu. Elle tire trop souvent partie de la *Remedial Processing Option* qui consiste à résoudre sans comprendre, en appliquant une recette. C'est dans le cadre de cette conception « constructiviste » de l'enseignement qu'il semble intéressant de modéliser l'évolution du modèle mental. Peu d'auteurs font cas d'une telle évolution. White et Frederiksen présentent une étude qui aborde les modifications qui s'effectuent au sein du modèle mental de l'apprenant au cours de l'apprentissage [WHITE ET FREDERIKSEN,

1990]. Pour cela, ils ont recours à un changement de modèle mental. L'évolution de l'apprenant est modélisée par une succession de modèles mentaux prédéfinis qui sont plaqués les uns à la place des autres. De cette manière, les auteurs montrent le raffinement du modèle mental mais aucunement la manière dont il évolue pour passer d'une étape à la suivante. C'est une simple progression en marche d'escalier. De plus, leur modèle de départ ne comporte aucune mauvaise représentation ; tout ce qu'il comporte fait partie intégrante du modèle que possède l'Expert, il s'agit d'une modélisation de l'étudiant par la méthode dite *Overlay*. Les auteurs abordent l'apprentissage selon la définition simpliste précédemment énoncée et présentée à la Figure 2-1. Notre approche se veut un peu plus proche de la conception qualifiée de réaliste, qui traduit l'évolution des connaissances présentée à la Figure 2-6, page 21.

Une étude intéressante [ROWE ET COLL. 1992], mais qui, à notre connaissance, n'a pas donnée de suite, présente une méthode et des résultats de comparaison de modèles mentaux d'experts et de novices au sujet de moteurs d'automobiles. Cette étude tente d'évaluer différentes méthodes de mesure de modèles mentaux en terme de précision et de stabilité de la mesure au cours du temps. Des corrélations de deux types sont évaluées : l'une dite « intra-sujet » et l'autre nommée « inter-sujet ». La première représente la corrélation des réponses d'un sujet individuel entre une première et une deuxième session de tests. Elle donne une indication sur la robustesse à travers le temps du modèle mental d'un sujet. La seconde représente l'évaluation de la corrélation d'un sujet avec chacun des autres sujets du même groupe d'expérience. Les tests utilisés étaient de trois types : tests de familiarité (classer par ordre de priorité les façons de réparer un type de pannes), les tests de spécificité (classer les types de pannes classiques suivant le type de moteur) et des tests de parenté (donner le degré de parenté entre plusieurs pièces constitutives d'un moteur). Les résultats montrent que chaque technique de mesure des modèles mentaux utilisée semble être suffisamment précise pour différencier les novices des experts. La méthode intra-sujet semble plus significative statistiquement et dans tous les cas, la corrélation est plus grande. D'autre part, les experts sont plus souvent d'accord entre eux que les novices.

2.8 Conclusion

Des résultats émanant de la psychologie cognitive, en tant que science de la construction du savoir, nous invitent fortement à considérer l'importance de l'analyse des modèles mentaux afin de suivre un apprenant dans sa phase d'apprentissage. L'analyse des modèles mentaux, c'est-à-dire l'analyse de ce qui nous gouverne dans l'utilisation des choses, permet également d'évaluer le transfert des connaissances qui a eu, ou n'a pas eu lieu, lors de cet apprentissage. Il est également possible, à partir des représentations mentales, d'évaluer les différences entre les Novices et les Experts. Plusieurs travaux de recherche ont été entrepris afin de développer des moyens informatiques qui faciliteraient le transfert et le rendraient plus efficace, mais ils ne considèrent pas tous sérieusement l'importance des modèles mentaux dans ce domaine.

CHAPITRE 3

LES SYSTÈMES INFORMATISÉS DE FORMATION

3.1 L'intelligence artificielle et les systèmes experts

L'intelligence artificielle constitue une approche de conception informatique qui préconise la représentation des différents types de connaissances dans le logiciel, ainsi que l'utilisation de ces connaissances de manière dynamique au sein du logiciel. Le développement de systèmes experts met en application ce concept. Un système expert est un outil déductif qui résulte d'une étude minutieuse des connaissances auxquelles a recours un expert dans son domaine. Il est constitué de trois composantes distinctes : une base de connaissances, un moteur d'inférences et une base de faits. Historiquement, la base de connaissances est constituée de règles de production, il s'agit d'expressions de la forme :

$$\text{Condition(s)} \implies \text{Action(s)}$$

qui représentent les connaissances sous forme de doublet Condition(s)-Action(s). Le déclenchement d'une règle consiste à provoquer une action suite à l'identification d'une situation remplissant une certaine condition. Ces règles prennent communément la forme « Si...Alors ». L'action entreprise peut amener une nouvelle situation, remplissant une condition qui autorise le déclenchement d'une ou plusieurs règles et ainsi de suite. Le moteur d'inférences constitue le coeur du système expert : il puise dans la base de connaissances celles qui s'appliquent afin d'établir de nouveaux faits par déduction. Enfin, la base de faits regroupe les données du problème, les résultats des déductions et des actions. La déduction est le plus souvent obtenue par application de la règle du *Modus Ponens*: « Si p fait partie de la base de faits, (c'est une donnée du problème, par exemple), si la règle $p \implies m$ fait partie de la base de règles (c'est une connaissance traduisant l'expertise du domaine), alors le moteur d'inférences permet d'ajouter le nouveau fait m à la base de faits. »

3.2 L'historique des systèmes informatisés d'apprentissage

3.2.1 L'enseignement assisté par ordinateur

Les débuts de l'Enseignement Assisté par Ordinateur (E.A.O.) reposaient sur un principe simple : il s'agissait de présenter à l'étudiant une notion du cours suivie d'une question s'y rapportant et nécessitant une réponse succincte. La réponse de l'étudiant permettait d'orienter le chemin ultérieur de l'apprentissage. Cette méthode utilise la structure Si-Alors-Sinon :

Si l'étudiant a bien répondu

Alors on présente une nouvelle notion

Sinon on reprend la même notion (sous la même forme ou sous une forme différente).

De nombreux raffinements ont été apportés afin d'améliorer la convivialité des logiciels : l'utilisation du nom de l'apprenant et le choix aléatoire des messages présentés plutôt que la reprise de manière répétitive du même message en sont des exemples.

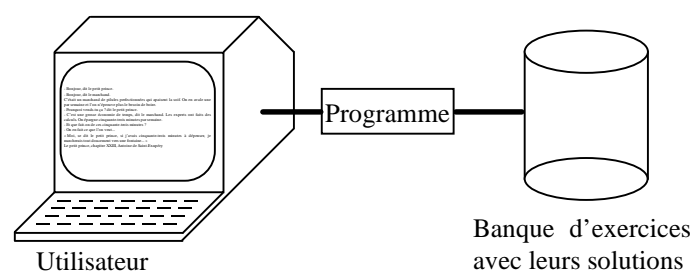


Figure 3-1 La structure d'un programme d'E.A.O. classique [LELOUCHE, 1988]

Une approche dite orientée par cadres-types consiste à essayer d'anticiper toutes les réponses possibles de l'apprenant. La structure générale restant la même que précédemment, il s'agit de varier les branchements effectués : un cadre-type est associé à chaque cause possible de réponse et couvre une ou plusieurs réponses erronées spécifiques. La Figure 3-1 représente la structure informatique de ce type de logiciels. Dans ce genre de logiciels, l'apport des systèmes experts et de l'intelligence artificielle reste réduit. Un simple programme comportant une succession de tests permettent l'implantation d'un tel système. En effet, de tels programmes ne peuvent être qualifiés d'intelligents. Ils sont essentiellement axés sur la présentation de pages d'écran se succédant,

suivant une hiérarchie arborescente prédéfinie, résultant de l'interaction Machine-Apprenant par un jeu de Questions-Réponses. (La question est posée par le système et la réponse est fournie par l'apprenant). Le système ne comprend pas la question qu'il pose, ni la réponse attendue, et il est encore moins capable d'interpréter la réponse de l'apprenant. L'évaluation de la réponse ne peut dans ce cas, être faite que par comparaison de chaînes de caractères, ou bien par l'intermédiaire de questionnaire à choix multiples. De plus, le fait que ces programmes ne contiennent pas de véritable modèle de l'apprenant interdit toute personnalisation des échanges Machine-Apprenant. D'autre part, la programmation des écrans et de la totalité du scénario d'apprentissage est une très lourde charge de travail. La production d'une heure de dialogue avec l'apprenant peut nécessiter plus de 150 heures de travail et de développement.

3.2.2 L'enseignement intelligemment assisté par ordinateur

Une nouvelle approche est présentée avec SCHOLAR [CARBONELL, 1970]. Il s'agit d'un programme d'Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur (E.I.A.O.). Il avait pour but d'enseigner la géographie de l'Amérique du Sud. Ce type de logiciel, également appelé dans la littérature anglophone *Intelligent Tutoring System* (I.T.S. ou S.T.I en français, pour Système Tutoriel Intelligent), résulte de travaux menés conjointement en intelligence artificielle et en éducation. Sa particularité de posséder une représentation interne des connaissances qu'il doit enseigner le différencie des autres logiciels d'enseignement et en fait un précurseur dans cette nouvelle ère. L'avantage que cela apporte est que le programme sait résoudre lui même les problèmes qu'il pose ; il peut donc se passer de la solution des exercices et il est possible d'y adjoindre un générateur d'exercices. Le programme tire son expertise d'une banque de connaissances qui couvrent le domaine illustré par les exercices. De plus, l'étudiant peut avoir accès à la démarche de résolution à laquelle a recours le programme et la suivre. De ce fait, il sera plus à même d'identifier son erreur et de la comprendre.

Ce type de système apporte un autre avantage et non des moindres : son expertise lui permet de répondre à des requêtes formulées par l'apprenant. Celles-ci peuvent aller de la simple répétition ou la reformulation, à la résolution d'exercices proposés par l'apprenant, ou la présentation d'une variante de la solution. Ce type d'interaction nécessite une interface plus élaborée et robuste. Elle

doit permettre un « dialogue à initiative partagée ». De plus, la reformulation requiert une variété d'explications, de démarches et de justifications possibles des réponses. Ceci différencie les simples systèmes experts des logiciels d'E.I.A.O. La Figure 3-2 présente un système d'E.I.A.O. expert de son domaine ; il se divise en trois composantes :

- Une base de connaissances sur le domaine à enseigner, et un moteur d'inférence opérant sur cette base ;
- Une interface-utilisateur pour interpréter correctement les réponses et les requêtes de l'apprenant avant de les transmettre au moteur ; là est le dialogue à initiative partagée ;
- Une banque d'exercices (les solutions sont inutiles) avec un programme de sélection, ou bien un générateur d'exercices.

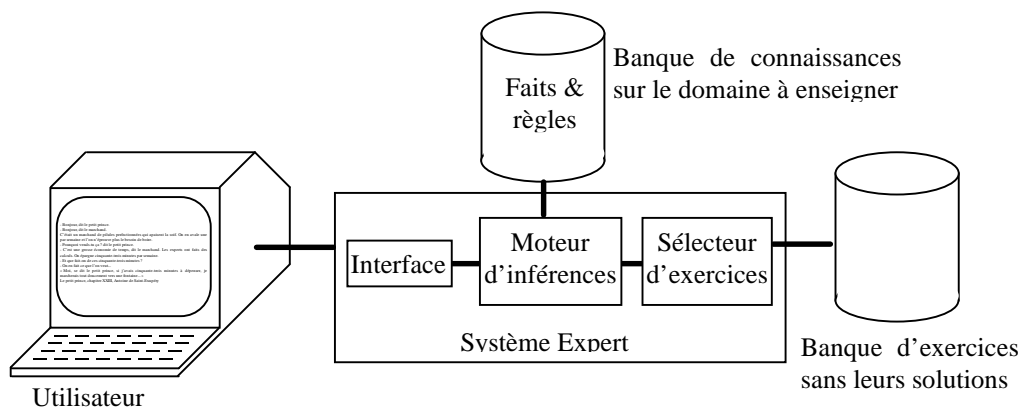


Figure 3-2 La structure d'un logiciel d'E.I.A.O. [LELOUCHE, 1988]

3.2.3 L'E.I.A.O. Psychopédagogue

L'E.I.A.O. psycho-pédagogue constitue un degré d'élaboration supérieur : on ajoute au système précédent une base de connaissances concernant les stratégies tutorielles. Les faits sont les différents types d'intervention du logiciel et les règles transcrivent les modalités de ces interventions. La Figure 3-3 représente l'architecture d'un tel système. Il est composé :

- d'un premier système expert dans le domaine enseigné avec sa base de connaissances, son moteur d'inférences et un sélectionneur/générateur d'exercices ;
- d'un second système expert en pédagogie : le module tuteur ; sa base de connaissances porte sur les stratégies tutorielles ;
- d'un module de gestion du modèle de l'apprenant ;
- d'un module d'interface et de dialogue convivial avec l'apprenant.

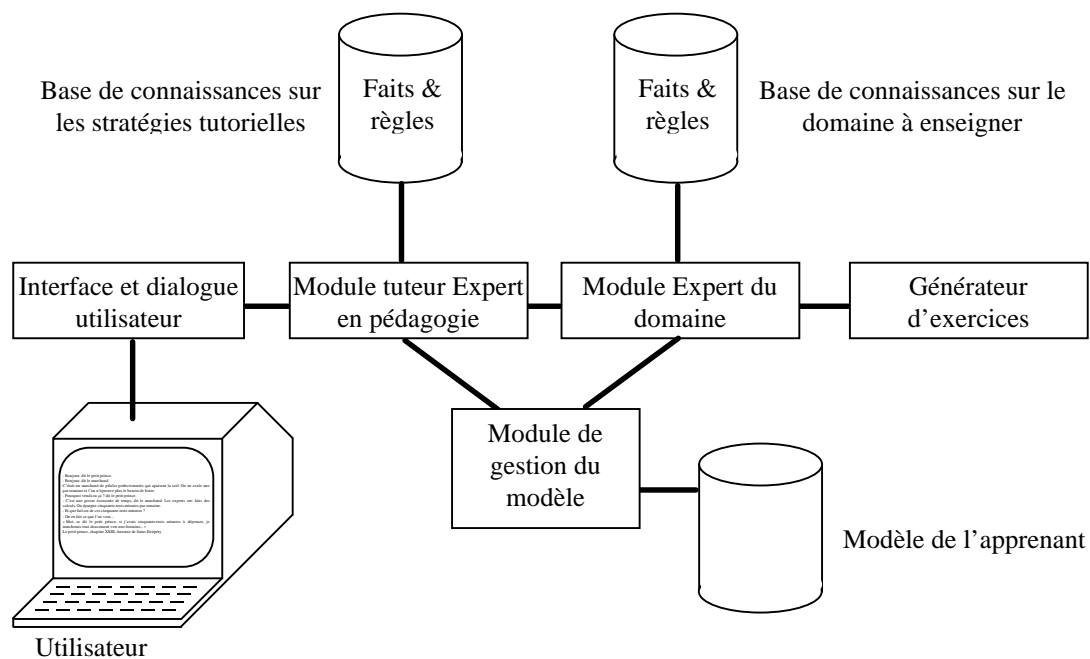


Figure 3-3 La structure d'un système d'E.I.A.O. psycho-pédagogique [LELOUCHE, 1988]

Le choix de la stratégie tutorielle incombe au module Tuteur. Il s'effectue selon des déclencheurs de diverses natures :

- le dialogue antérieur entre le système et l'apprenant ;
- l'état d'avancement de la résolution du problème en cours ;
- mais, aussi et surtout, le modèle de l'apprenant.

Le modèle de l'apprenant regroupe des connaissances relatives au domaine enseigné (ce qu'il sait, ce qu'il sait faire) et des connaissances indépendantes du domaine enseigné (mécanismes d'apprentissage).

Ce type de système permet un apprentissage à la carte, l'enseignement s'adapte à l'apprenant qui évolue à son rythme. Ceci n'est pas possible lors d'une séance d'enseignement magistral pratiquée couramment. Mais il reste que l'expérience pédagogique intuitive des « enseignants humains » est bien supérieure à toute la connaissance relative à ce sujet que l'on pourrait introduire dans une machine.

En résumé, un système d'E.I.A.O. est un système expert, à vocation pédagogique, dont les techniques d'intelligence artificielle lui confèrent un rôle de machine à enseigner ayant la faculté de s'adapter aux besoins de l'apprenant. Outre sa faculté de résolution de problèmes, le système doit être doté d'une aptitude à évaluer la stratégie conduisant à la solution. La comparaison entre la méthode de l'apprenant et celle de l'Expert, permise par une représentation détaillée des connaissances, permettra à l'apprenant d'évaluer sa progression et de modifier ses connaissances en conséquence. C'est ce que Anderson (1983, 1990 et 1992) appelle le *Model Tracing*.

3.3 Les différentes approches de conception

3.3.1 Une ossature qui fait l'unanimité

Dans le domaine de l'E.I.A.O., les auteurs s'accordent pour regrouper les connaissances en modules distincts. L'anatomie de ces systèmes est présentée à la Figure 3-4 ; elle comprend :

- le module Expert (relatif aux connaissances du domaine enseigné) ;
- le modèle Étudiant (une représentation évolutive de la connaissance de l'apprenant au cours de son apprentissage) ;
- le module Tuteur (l'ensemble des stratégies d'enseignement auxquelles peut avoir recours le système ainsi que leurs critères de sélection) ;
- l'interface entre le système et l'apprenant.

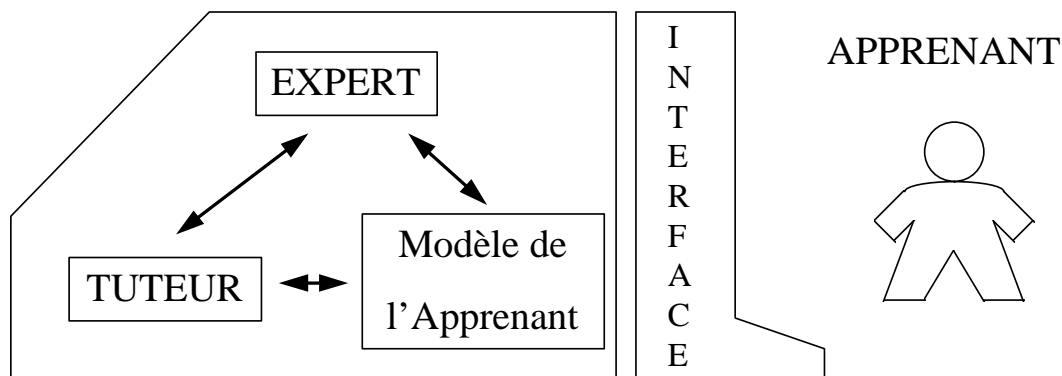


Figure 3-4 La structure quasi-unanime d'un système expert dédié à l'apprentissage [adaptation d'ANDERSON, 1988]

Ces modules renferment les trois types de connaissances [ANDERSON ET COLL., 1990] : les connaissances déclaratives, les connaissances procédurales et les connaissances causales ou conditionnelles. C'est sur cette différence entre les différents types de connaissances que repose la théorie cognitive d'Anderson : P.U.P.S. (Pen Ultimate Production System) et son prédécesseur A.C.T. (Adaptative Control of Thought) [ANDERSON, 1983]. Dans cette théorie, les connaissances procédurales dérivent de l'interprétation de l'utilisation des connaissances déclaratives. Anderson utilise le terme de compilation pour faire référence au processus d'apprentissage qui produit les connaissances procédurales. Dans A.C.T. et P.U.P.S., Anderson représente les connaissances par un jeu de règles de production qui définissent et traduisent la compétence. Le but visé est d'amener l'apprenant à acquérir par expérience la règle de production que possède l'expert.

3.3.2 Les méthodes de représentation des connaissances

Les auteurs de systèmes d'E.I.A.O. s'entendent sur la distinction des types de connaissances ainsi que la séparation en module Expert, Étudiant, Tuteur et Interface. Les différences d'approche se situent plutôt au niveau de l'implantation informatique de ces concepts. La structure de la représentation de la connaissance varie énormément suivant les auteurs. Outre les règles de production que nous avons déjà mentionnées, deux grandes catégories sont à noter : les réseaux sémantiques et les objets structurés. Les réseaux sémantiques constituent un moyen de représenter les liens qui unissent un concept avec d'autres. Chaque concept est un noeud et les liens forment

des arcs exprimant la relation entre deux concepts. C'est l'interprétation de ces liens qui confère un sens au réseau : en lui-même, il ne contient pas d'information sémantique. Par cette architecture, il est possible de déduire de nouvelles relations entre concepts par propagation des propriétés d'autres concepts à travers les liens du réseau [CARLSON ET RAM, 1990]. La recherche de déductions possibles à partir de faits connus rapprochés par la structure du réseau peut s'obtenir par la méthode dite *spready activation*. Elle consiste à activer, en partant de deux noeuds, tous leurs voisins, puis les voisins des noeuds activés, et ainsi de suite par vagues concentriques. Dès qu'un noeud est activé par les deux vagues, un chemin de relation a été trouvé, établissant un lien entre les deux concepts initiaux représentés par les deux objets.

Les objets structurés (ou cadres conceptuels ou encore *frame*) consistent à détailler la connaissance relative à un objet ou à un concept, en une liste de ses attributs (aussi appelés *case*, *facette* ou *slot*). Chaque attribut représente une caractéristique de l'objet. Il est possible d'y adjoindre des méthodes qui déterminent son comportement, les actions qu'il peut entreprendre, le domaine de ses attributs, etc. Il devient possible de définir un objet comme étant un composé de plusieurs objets ou, à l'inverse, comme une des composantes d'un objet. Un objet peut également hériter des attributs et des méthodes d'un autre objet. Cette technique apporte beaucoup de clarté et de cohérence dans le stockage de l'information. Elle est très modulaire et représente bien la hiérarchie qui existe au sein de la connaissance de l'Expert.

D'autres techniques de représentation des connaissances existent, mais elles sont peu ou pas utilisées dans le domaine de l'E.I.A.O. Pour mémoire, notons la logique, les représentations procédurales (les algorithmes), les représentations par analogies (les schémas, les cartes, les diagrammes...).

Les différences majeures existant entre les différents systèmes d'E.I.A.O. se situent dans le choix de modélisation des différents modules : expert, étudiant, tuteur et interface. Certains auteurs ont opté pour des approches face à ces concepts en s'affranchissant du domaine concerné. L'Interface et le module Tuteur se prêtent le mieux à cette démarche. Le module Expert quant à lui est fortement dépendant du domaine. Au sujet du module Étudiant, la tâche n'est pas aisée :

modéliser fidèlement l'évolution de l'apprenant tout en restant indépendant du domaine reste un problème qui n'a pas trouvé sa solution.

Comme nous l'avons mentionné lors de l'introduction, nous nous sommes concentrés sur le formalisme de représentation et de comparaison des représentations mentales. Nous aborderons donc les parties concernant l'interface et le tuteur par souci de complétude de cet historique.

3.3.3 Le module expert

Pour Anderson, le module Expert est l'épine dorsale d'un S.T.I. Un système d'apprentissage puissant n'est pas concevable sans un contenu important de connaissances concernant le domaine. Il faut consacrer une grande partie du temps ainsi qu'une grande attention à la codification des connaissances [ANDERSON, 1988]. Typiquement, il existe trois approches dans la manière de procéder à ce codage.

La première tend à trouver une façon de raisonner à propos du domaine tout en s'affranchissant de la représentation et de l'encodage qui font appel à l'intelligence humaine ; par exemple, un système peut manipuler des équations mathématiques et les résoudre sans pour autant savoir le phénomène qu'elles représentent. Il s'agit de rendre compte numériquement de ce qui a lieu symboliquement. Ceci est mis en œuvre dans SOPHIE [BROWN et coll., 1982], qui utilise le simulateur SPICE pour déterminer les pannes survenant dans des circuits électriques. Ce système ne contient aucune considération qualitative concernant les courants électroniques, mais peut quand même les simuler à l'aide de modèles mathématiques. Ce premier type de modèle est appelé le modèle de la boîte noire ou *black box*.

La seconde approche consiste à procéder de la même manière que lors du développement d'un système expert. Cette méthode nécessite l'extraction des connaissances d'un expert du domaine ainsi que la mise au point d'un moyen de codification et d'application de cette connaissance. Bien que la connaissance provienne d'un être humain, la façon dont elle est appliquée peut ne pas correspondre forcément à la façon dont un expert humain l'applique.

La troisième approche est de franchir une étape supplémentaire et de faire du module Expert une simulation, à un certain degré d'abstraction, de la façon dont l'être humain utilise ses connaissances. Il s'agit de modèle cognitif ; c'est clairement l'approche qui demande le plus de travail pour développer un module Expert mais, selon Anderson (1988), elle est essentielle pour obtenir des résultats de haute performance dans un système d'apprentissage. Il n'est pas raisonnable de considérer l'efficacité d'un module Expert par lui même ; par contre, il faut prendre en considération le modèle de l'Expert au sein du tutoriel dont il est une composante. L'efficacité pédagogique va en augmentant de la première à la troisième possibilité, et l'effort que nécessite l'implantation croît dans le même sens.

Ces trois approches comportent des points forts et des points faibles qu'il est intéressant d'analyser suivant l'orientation que l'on veut prendre lorsqu'on souhaite développer un modèle de l'expert.

Du point de vue de l'apprentissage, le principal défaut du modèle de la boîte noire est que son contenu et son mode d'opération n'ont aucune commune mesure avec la façon dont procède l'expert. Le module Expert sera donc incapable de montrer et d'expliquer la démarche et le raisonnement qui l'ont conduit à agir de la sorte. Par exemple, le comportement d'un expert de jeu d'échec peut être idéalement modélisé en évaluant les millions de coups possibles afin de sélectionner la séquence menant à la victoire. Évidemment, une telle pratique ne reflète aucunement le comportement de l'expert. D'ailleurs, il ne s'agit plus, à ce niveau, d'expertise à proprement parler mais plutôt de tour de force ! Un module ainsi conçu ne peut que dire à l'apprenant: « c'est juste », « c'est faux », « fais ça », sans lui indiquer les raisons qui mènent à cette conclusion. Afin de formuler des explications appropriées, il faut pouvoir accéder à la structure interne de la connaissance de l'expert. Il s'agit d'une analyse en profondeur, par opposition à l'analyse de surface précédemment énoncée. L'avantage majeur de cette méthode reste qu'elle est peu coûteuse en termes d'efforts de développement et d'implantation au sein d'un système d'apprentissage. Elle est très utilisée dans les systèmes d'E.A.O.

La seconde approche, celle apparentée au système expert, nécessite une analyse des connaissances impliquées dans le domaine. Un spécialiste en gestion des connaissances et un expert du domaine

identifient conjointement l'étendue du domaine du problème, énumèrent et formalisent les concepts clefs et un moyen d'implanter la connaissance. Ces systèmes sont caractérisés par la grande quantité de connaissances qu'ils contiennent ainsi que par leur similitude avec la nature humaine. Le plus souvent, il s'agit de règles de production qui sont déclenchées les unes à la suite des autres. GUIDON [CLANCEY, 1982] reprend la méthode développée dans MYCIN [SHORTLIFFE, 1976]. Ce dernier est constitué d'environ 450 règles de la forme « Si...Alors » représentant l'expertise dans le domaine des infections bactériennes. Mais ces règles, avec des probabilités d'exactitude, prennent une forme tellement complexe, qu'elles ne peuvent être présentées telles quelles à l'apprenant comme moyen de démonstration du cheminement du raisonnement de l'Expert. GUIDON utilise en plus la structure interne de la connaissance de l'Expert en termes de règles et de buts afin de dispenser son instruction et d'en choisir la forme. Cette technique est coûteuse du fait de la phase d'analyse des connaissances entrant en jeu. Il reste que ces systèmes tirent eux aussi grand profit de la facilité procurée par les ordinateurs : l'exploration exhaustive qui ne reflète pas l'expertise. Ces travaux ont montré qu'il était bon de s'intéresser aux connaissances impliquées, mais qu'un système d'apprentissage devait également se préoccuper de la manière dont elles intervenaient dans le raisonnement. Ceci a débouché sur l'approche cognitive de l'enseignement.

En ce qui concerne la troisième approche, le but d'une modélisation cognitive est de développer effectivement une simulation du processus de résolution de problèmes dans un domaine et de son utilisation humaine, domaine pour lequel la connaissance est divisée en composantes significatives et semblables à celles de l'être humain. Cette technique provient du souci de pouvoir accéder plus facilement et plus en profondeur à la connaissance de l'Expert dans le but de la communiquer à l'apprenant. Bien sûr, cette façon de faire est encore plus coûteuse en effort de développement, principalement à cause du nombre de détails qui doivent être incorporés dans le modèle cognitif. L'étude des modèles cognitifs, selon Anderson et coll. (1990), nécessite la séparation de la connaissance en trois espèces, comme nous l'avons vu précédemment. Cette distinction peut être naturelle compte tenu du domaine. Ainsi, la résolution de problèmes en arithmétique fait appel, en majeure partie, à des connaissances procédurales pour savoir comment réaliser une tâche, alors que d'autres domaines, comme la géographie, nécessitent principalement des connaissances déclaratives sous forme d'un ensemble de faits. Lorsqu'il s'agit de dépannage

ou de diagnostic, ces tâches ont plus souvent recours à un raisonnement dit causal afin d'expliquer le comportement d'une composante et de raisonner sur le comportement observé. Ces connaissances relèvent de la simulation mentale et du raisonnement autour des processus dynamiques et évolutifs.

3.3.4 Le modèle étudiant

La modélisation de l'étudiant a tout d'abord suivi deux courants de pensée qui posaient la distinction majeure entre Expert et Novice de manière différente⁵. La première méthode suppose que l'état des connaissances du Novice est, durant toute la phase d'apprentissage, un sous-ensemble de la connaissance de l'Expert. Cette méthode consiste à modéliser le Novice en prenant le modèle de l'Expert et en lui superposant une sorte de masque comportant des trous ne laissant ainsi voir au Novice qu'une certaine partie des connaissances de l'Expert. C'est le modèle de recouvrement ou *Overlay Model*. Cette approche ne tient pas compte de l'état initial du Novice comme nous l'avons expliqué lors du chapitre précédent dans la définition simpliste. La seconde méthode consiste à modéliser l'étudiant toujours à partir d'un modèle de l'Expert, en lui ajoutant cette fois une liste d'erreurs, modélisant les mauvaises notions, ainsi que les notions manquantes du Novice. Cette méthode est connue sous le nom de *Bug List*. Cette approche est proposée par Brown et Burton [BROWN et BURTON, 1978]. Selon les auteurs, les erreurs commises lors de la résolution de problèmes sont dues à l'application de mauvaises règles qui s'apparentent à des règles de production standard telles que celles utilisées par les Experts, à la différence - fondamentale - près qu'elles sont, à la base, erronées. Il est possible de classer ces erreurs et il apparaît que nombre d'entre elles sont indépendantes du domaine traité, mais relèvent plutôt du processus général de résolution de problèmes, d'interprétation et de transcription de l'énoncé [THÉRIEN et coll., 1990 ; MANDL et coll., 1992]. Burton présente un programme, DEBUGGY, basé sur ce principe et une version interactive IDEBUGGY [BURTON, 1982]. Brown et VanLehn basent sur cette approche de la *Bug Library* leur système *Repair Theory* qui ne se contente pas simplement d'expliquer les erreurs observées mais aussi de prédire les types d'erreurs qui peuvent

⁵ Cette distinction fait référence aux deux définitions - simpliste et réaliste - entre Novice et Expert, telles que détaillées à la Figure 2-1, page 14.

survenir et celles qui ne le peuvent pas [BROWN et VANLEHN, 1980]. Payne (1988) critique cette pratique : selon lui, le modèle Étudiant doit être plus complexe que la simple *Bug Library* où tout ce qui est nécessaire est la simple comparaison de l'erreur de l'apprenant avec une liste précompilée d'erreurs et de mauvais raisonnements possibles. D'un point de vue cognitif, la modélisation de l'étudiant à l'aide d'une liste précompilée d'erreurs ne reflète d'aucune manière le processus d'acquisition de connaissances. Nous pensons, à l'instar de Payne, qu'il est préférable d'analyser l'erreur dans son contexte, afin de faire ressortir les concepts sur lesquels porte la confusion.

D'autres méthodes permettant la modélisation de l'apprenant sont utilisées :

3.3.4.a *Les réseaux de neurones*

Cette technique d'intelligence artificielle permet la prédiction de la réponse de l'apprenant par réseau de neurones entraînés [BEALE et FINLAY, 1989 ; MENGEL et LIVELY, 1992]. Cette approche est justifiée par le fait que le cerveau humain procède de manière massivement parallèle, donc une modélisation de son fonctionnement se doit de rendre compte de cette manière de procéder [DREYFUS, 1989]. Selon une étude, un système combinant un réseau de neurones et des règles de production peut changer sa façon de penser en passant du novice à l'expert lors de la phase d'apprentissage du réseau de neurones [LAMBERTS, 1988].

3.3.4.b *Les graphes génétiques*

Les graphes génétiques [GOLDSTEIN, 1982] modélisent l'état cognitif de l'apprenant à un instant donné sous forme de graphes, où les noeuds sont les connaissances (faits ou règles), reliés entre eux par des arcs matérialisant une relation entre ces connaissances. Ces relations peuvent être le raffinement, l'analogie, la généralisation ou la spécialisation. Il s'agit en quelques sortes de représenter la provenance des connaissances en termes de dépendances. Le terme génétique est à considérer dans son sens original : « l'information reliée à l'origine et au développement d'un phénomène ». Une amélioration est apportée à ce modèle [WASSON, 1985]. En effet, ce modèle est statique, il représente la connaissance à un instant donné. Il ne peut donc rendre compte de l'évolution caractérisant l'apprentissage. Le modèle doit être capable d'apprendre. L'auteur

propose donc l'adjonction d'une quatrième composante, à la structure tripartite habituelle (Expert, Étudiant, Tuteur) caractérisant un S.T.I., qu'elle appelle le psychologue. Il s'agit d'une composante à laquelle le système fait souvent référence en tant qu'élément de diagnostic et qui se partage entre le modèle de l'apprenant et le module tuteur.

3.3.4.c *L'approche Objet*

Meurrens expose une gestion du modèle de l'apprenant à la manière de la programmation orientée objet [MEURRENS, 1989]. Il s'agit en fait d'un système auteur permettant le développement de didacticiel dans n'importe quel domaine. L'écriture des règles modélisant l'expert et les stratégies tutorielles incombent à l'auteur du didacticiel, et sont sous forme d'objets ayant des caractéristiques et étant interconnectés entre eux. Le modèle est conservé en mémoire sous la forme d'un tableau de données ou d'un ensemble de règles. La granularité des objets (i.e. leur degré de définition) doit être choisie pour que la plus petite erreur ou mauvaise compréhension d'un élève puisse être détectée. Le système gère en plus pour chaque objet (un objet symbolise une connaissance) deux paramètres : le niveau de maîtrise et le niveau de pertinence. Le niveau de maîtrise sera d'autant plus élevé que l'objet a été plus souvent ou mieux exécuté, compris et utilisé. Plus l'apprenant appliquera une stratégie pédagogique ou comprendra un texte ou atteindra un objectif de manière efficace, plus le niveau de pertinence de l'objet en cause sera élevé.

3.3.5 Le module tuteur

Les deux sections précédentes ont montré comment il est possible de représenter l'expertise d'un domaine et comment modéliser les changements qui s'opèrent chez l'apprenant au cours de l'apprentissage. Le module Tuteur effectue le lien entre ces deux modules afin de déterminer ce qui doit être corrigé. Une des distinctions entre l'E.A.O. et l'E.I.A.O. réside dans la particularisation de l'enseignement à un apprenant spécifique. C'est au module Tuteur que revient, en l'adaptant à l'apprenant, le choix du scénario d'apprentissage modélisé par le module étudiant. En E.A.O., le tuteur n'est pas présent en tant que module du système, mais est inclus de manière figée dans le programme lui-même. C'est l'algorithme qui peut être vu comme tuteur.

Dans le souci de dispenser un enseignement fructueux, il faut définir le rôle du tuteur. Trois caractéristiques ressortent quelle que soit la technique utilisée pour développer le module tuteur :

1. Le tuteur doit avoir le contrôle du programme d'enseignement ; c'est-à-dire la sélection et l'ordonnancement de ce qui est présenté.
2. Le tuteur doit pouvoir répondre aux requêtes de l'apprenant au sujet du domaine considéré.
3. Le tuteur doit être capable de déterminer quand l'apprenant a besoin d'aide au cours de l'apprentissage d'une tâche et de quelle sorte d'aide il a besoin.

Le court passé des tuteurs automatiques présente un changement radical dans le choix des stratégies d'enseignement. Certains tuteurs se limitaient à la présentation de données factuelles et de compétences permettant de faire des inférences simples depuis ces connaissances. Ces tuteurs concernent l'exposé de connaissances déclaratives au sens défini par Anderson. C'est essentiellement par le dialogue que sont transmises les connaissances. Mais on ne peut parler de réel transfert de connaissances du fait du non contrôle de l'intégration des connaissances exposées aux modèles mentaux de l'apprenant.

Le programme SCHOLAR [CARBONELL, 1970], qui enseigne la géographie de l'Amérique du Sud et WHY [STEVENS ET COLLINS, 1977], le premier logiciel qui s'attarde à développer de véritables stratégies tutorielles, incarnent ce changement. Ces tuteurs sont qualifiés de tuteurs par exposé. La Figure 3-5 illustre le dialogue socratique entre le tuteur Why et un étudiant.

Un exemple de règle pour implanter informatiquement le discours socratique, qui est une stratégie tutorielle, est présenté à la Figure 3-6.

Why : Pensez-vous que la jungle amazonienne a de fortes précipitations ou de faibles précipitations ?

(demander une prédiction à propos d'un cas particulier)

Étudiant : de fortes précipitations.

Why : Pourquoi l'Amazone a de fortes précipitations ?

(demander une cause première)

Étudiant : Parce que c'est proche de l'Atlantique.

Why : Oui, la jungle amazonienne est proche de l'Atlantique équatorial. En quoi cela affecte-t-il les précipitations dans la jungle amazonienne ?

(demander une cause intermédiaire)

Étudiant : L'eau y est chaude.

...

Why : Pensez-vous que n'importe quelle région montagneuse connaît de fortes précipitations ?

(former une règle générale à partir d'une cause insuffisante)

Étudiant : Oui.

Why : Le sud de la Californie a des montagnes. Pourquoi le sud de la Californie ne connaît-il pas de fortes précipitations ?

(trouver un contre exemple pour une cause insuffisante)

Figure 3-5 Un exemple de tuteur socratique utilisé dans Why [STEVENS ET COLLINS, 1977]

Si

l'étudiant donne une explication d'un ou plusieurs facteurs qui ne sont pas suffisants,

Alors

formuler une règle générale qui signifie que le ou les facteurs donnés sont suffisants et demander à l'étudiant si la règle est vraie.

Figure 3-6 Un exemple de règle pour le tuteur utilisant le discours socratique [COLLINS, 1976]

La compétence d'un tuteur est évaluée selon deux points de vue essentiels qui font la qualité des tuteurs humains : sa faculté à répondre aux questions et la pertinence de ses interventions. Pour qu'un tuteur puisse répondre aux questions formulées par l'apprenant, encore faut-il qu'il soit capable de comprendre ou du moins de percevoir le sens et le but de la question. Le système SCHOLAR effectue la reconnaissance de la question par comparaison et mise en correspondance

avec un patron. Le système SOPHIE [BROWN et coll., 1982] est un peu plus sophistiqué : la réponse est déterminée par l'exécution systématique d'un modèle mathématique correspondant à ce que demande l'étudiant au sujet du comportement d'une composante d'un circuit. Ceci nécessite quelques limitations du point de vue de la question. L'étude des circuits électriques est un domaine bien modélisé et qui se prête bien à ce genre de pratique.

La principale difficulté soulevée par la réponse aux questions de l'apprenant se situe au niveau de la compréhension de ces dernières. Nombre de tuteurs contournent le problème posé par la compréhension du langage naturel en limitant le type de questions autorisées. Ainsi, comme nous l'avons déjà mentionné, la répétition d'une réponse, sa reformulation et la résolution de problèmes posés par l'étudiant constituent les requêtes que le tuteur peut satisfaire.

De plus, l'enseignement dispensé par le tuteur est d'autant plus efficace que ses interventions sont pertinentes et ceci à deux niveaux : celui des conditions d'interventions ainsi que celui du contenu des interventions. Les interventions du tuteur sont nécessaires pour garder le contrôle de la stratégie d'enseignement, pour prévenir et combattre les mauvaises représentations de l'étudiant et pour garder l'étudiant dans le chemin d'apprentissage souhaité.

3.3.5.a *Les conditions d'intervention*

Anderson (1988) préconise le *Model Tracing*. Cette stratégie tire profit du choix des règles de production lors de la modélisation de l'expertise du domaine et de l'apprenant. Il s'agit de placer le comportement de l'apprenant en situation de résolution de problèmes en correspondance avec une séquence de règles déclenchées au sein du modèle interne de l'étudiant idéal. On peut ainsi noter la déviation de l'étudiant par rapport au cheminement souhaité. Anderson favorise le *feed-back* immédiat, rendu aisé à mettre en œuvre grâce au *Model Tracing* : l'intervention a lieu dès qu'un écart est détecté dans le comportement de l'étudiant par rapport à celui de l'expert. L'argument sous-jacent à ce choix étant qu'il est plus facile pour l'élève d'analyser le cheminement mental qui l'a conduit à une erreur et d'effectuer la correction appropriée si cette erreur vient tout juste d'avoir lieu. Le *feed-back* immédiat permet également un apprentissage plus efficace parce qu'il évite une perte de temps et le risque d'apparition de mauvaises notions

lors de l'exploration de fausses pistes. Cependant, d'autres arguments viennent contredire l'intérêt du *feed-back* immédiat ; un bon exemple est le risque de donner une réponse toute faite à l'étudiant plutôt que de l'amener à la trouver par lui même et d'avoir recours à un processus cognitif qui fera de l'interaction avec le tuteur un réel transfert de connaissances à la place d'un exposé d'informations. Une autre solution consiste à ne pas destiner le *feed-back* immédiatement à l'apprenant, mais à le mémoriser et à lui restituer lorsqu'il en fait la demande (utilisé dans le Lisp Tutor [ANDERSON et REISER, 1985]) ou bien à la suite d'une solution complète (comme dans PROUST [JOHNSON et SOLOWAY, 1985]). La méthode du *Model Tracing* avec *feed-back* immédiat provoque des interruptions fréquentes dans le cheminement de l'étudiant et peut le déstabiliser.

La seconde approche consiste à intervenir lorsque le système a identifié la réponse de l'étudiant comme ayant un sens dû à l'application de règles justes ou erronées. Cette méthode procure des avantages que n'a pas le *Model Tracing*. Les interventions sont limitées à des phases d'instruction. Le tuteur relève les bonnes et les mauvaises performances, il sait où en est l'élève, et, en cas d'erreur, l'intervention peut être plus détaillée, car la cause de l'erreur a été identifiée.

3.3.5.b *Le contenu de l'intervention*

Une fois que le tuteur a décidé d'intervenir ou qu'il est sollicité, le système formule le contenu de l'intervention. Si l'intervention consiste en une correction directe de l'erreur relevée, tel un écart détecté lors du *Model Tracing*, il s'agit d'une intervention de bas niveau et qui sera très peu profitable pour l'étudiant : aucune action ne sera prise pour modifier sa représentation mentale et combattre la réapparition ultérieure de l'erreur. À un niveau plus élevé, le tuteur doit évaluer la provenance de l'erreur commise, donner un conseil d'ordre plus général que la correction pure et simple de l'erreur, (une règle, un théorème, un contre-exemple) et demander à l'élève de l'appliquer à son cas particulier. Cette intervention amènera l'élève à procéder à des modifications au sein de sa représentation ; il aura donc appris.

3.3.6 L'interface

La conception de l'interface permettant d'acquérir les demandes et les réponses de l'apprenant d'une part, et de donner les questions ainsi que les explications d'autre part, est souvent la

dernière étape dans l'élaboration des systèmes d'E.I.A.O. mais pas l'étape la plus simple. Le médium utilisé pour l'interaction, l'échange d'information entre l'apprenant et le système, est le vecteur qui transporte la connaissance. Les choix faits dans ce domaine constituent en eux-mêmes un modèle qui contient la connaissance. Un schéma, un dessin, une courbe présentés par le système seront autant d'éléments intégrés dans la mémoire de l'apprenant et rattachés à la notion abordée. L'interface d'un système informatique peut être perçue comme une imitation [LAUREL, 1986] au même titre qu'un acteur jouant un rôle au théâtre. Le but de l'interface est de faire entrer l'utilisateur dans le monde traité par le logiciel, de la même manière que l'acteur invite le spectateur à vivre l'action.

Les techniques d'interfaçage dans les systèmes d'apprentissage couvrent deux aspects. La première facette est propre à toute interface : elle détermine comment l'utilisateur interagit avec le système. Une interface de système d'apprentissage bien conçue permettra au système de présenter à l'utilisateur l'instruction elle-même mais, également, un *feed-back* d'une manière claire et directe afin de fournir un enseignement productif [JOHNSON ET NORTON, 1992]. De même, elle doit fournir à l'utilisateur un ensemble de techniques d'expression permettant de poser un problème ainsi que des hypothèses et de formuler des questions. Deuxièmement, l'interface détermine comment l'utilisateur interagit avec le domaine. De nombreux S.T.I. permettent à l'utilisateur de travailler directement dans le domaine enseigné. La simulation est un outil qui se prête très bien à de telles pratiques, mais ceci rentre plutôt dans la partie tuteur du système. Laurel (1986) distingue deux types d'interface : *First-Person* et *Second-Person*, ces deux termes ayant la signification des pronoms personnels JE et TU. Ils représentent la manière dont on agit avec le système. Le style « Première Personne » se retrouve dans de nombreux contextes, les plus communs étant les jeux du type Arcade ou les simulateurs, mais les tableurs, les logiciels de dessins et de conception assistés par ordinateur et même, plus simplement, les éditeurs de textes peuvent être cités. Les systèmes d'exploitation utilisant des icônes et des fenêtres tombent également dans cette catégorie d'interfaces. Une interface dite de type « Deuxième Personne » permettra à l'utilisateur d'interagir avec le domaine par le biais de messages adressés à un interpréteur intermédiaire. Les langages de commandes des systèmes d'exploitation sont de ce type, ainsi que certains jeux de rôle. Les interfaces par menus et celles en langage naturel sont d'autres exemples de cette catégorie. Dans le même ordre d'idées et toujours selon l'auteur, il est

possible de définir un type « Troisième Personne » qui s'adapterait à la plupart des films et des romans écrits sous forme narrative. Le spectateur, ou le lecteur est en dehors de l'action et se fait décrire ce qui se passe.

L'appellation de ces trois types découle, en fait de la distinction entre l'utilisateur et celui qui réalise vraiment l'action commandée. Dans le type « Première personne », c'est l'utilisateur qui exécute directement ce qu'il veut faire: « Je dessine un cercle, puis je le raccorde au carré... ». Dans le type « Deuxième Personne », l'utilisateur demande au logiciel de réaliser la tâche pour lui: « Tu copies le fichier du dossier A dans le dossier B... ». Et enfin, dans le type « Troisième Personne », l'utilisateur se fait juste rapporter ce que fait une tierce personne: « Il fait ça, puis il va là... ». Cette distinction est importante, car elle permet de regrouper et de mieux cerner les différences entre les interfaces. Pour une interface de type « Deuxième personne », l'utilisateur devra se souvenir du nom de la commande réalisant une fonction. Plus il y a de fonctions, plus il y a de commandes dont il faut mémoriser le nom et le format. Ces liens ne sont pas toujours naturels. Par exemple, l'action de déplacement d'un fichier sous UNIX se fait à l'aide de la commande « mv », abréviation du terme anglophone *move*. Par contre, l'utilisateur aura plus de contrôle sur ce qu'il fait qu'avec une interface de type « Première personne ». Le déplacement de plusieurs fichiers du même type se fait avec l'utilisation du « Joker » (i.e. le caractère astérisque *) sous UNIX, alors que la méthode Macintosh nécessite l'identification de chaque fichier et leur déplacement individuel. Le type « Deuxième Personne » permet une description des objets en termes de propriétés, ce qui est difficilement réalisable avec une interface de type « Première Personne ».

L'aspect technologique de l'interface n'est pas primordial du point de vue de l'apprentissage. L'efficacité de l'interface réside plutôt dans l'apport que cette dernière fournit au transfert de la connaissance, aussi bien par la manière dont elle présente les notions que dans son aptitude à accéder aux demandes de l'apprenant. L'interface doit permettre à l'apprenant de se bâtir et de compléter un « bon » modèle mental du domaine. Une interface de type « Première Personne » permet de faire apparaître les contraintes du domaine. Des graphiques peuvent être utilisés pour représenter des objets ainsi que des relations qui les unissent, soulignant ainsi les liens sémantiques du domaine. Les actions possibles dans le domaine le sont également dans l'interface

et de manière semblable. Mais l'interface doit être capable d'informer l'utilisateur sur les possibilités du système, sur les actions qu'il peut entreprendre ainsi que leurs conditions et conséquences. L'interface doit également rendre possible diverses stratégies d'apprentissage : répondre aux questions, corriger les erreurs, expliquer, etc. Ceci nécessite plutôt des interfaces de type « Deuxième Personne ». Le programme *Why* [STEVENS ET COLLINS, 1977] utilise une interface de type « Deuxième personne », le tuteur *Geometry* a une interface qui mélange les deux types [ANDERSON et coll., 1985]. Elle laisse à l'écran la démonstration en cours pendant que l'apprenant peut continuer à mener sa démonstration à partir des hypothèses en allant vers la solution, ou à l'inverse, à partir de la solution en essayant de remonter aux hypothèses. Un menu lui laisse en permanence sous les yeux, les outils auxquels il peut avoir recours.

Le module tuteur et l'interface ne font pas directement partie de notre étude, puisqu'ils constituent les parties situées de part et d'autre du processus de validation. Toutefois, nous nous sommes intéressés à ces aspects afin de pouvoir évaluer la faisabilité du projet une fois le formalisme et le processus établis. C'est pourquoi, nous avons repris, dans les deux précédentes rubriques, les principaux résultats que nous avons trouvés sur ces sujets. Ces rubriques pourront guider les recherches ultérieures qui seront menées pour compléter le projet.

3.3.7 Les systèmes multi-agents

La mise en œuvre de systèmes informatisés de formation de plus en plus efficaces conduit à reconsidérer l'approche algorithmique traditionnelle. En effet, les modèles utilisés sont de plus en plus détaillés et possèdent de plus en plus d'imbrications entre eux. Ceci combiné à la volonté de s'approcher le plus possible des processus d'apprentissage réels mènent à des applications de plus en plus complexes.

Les recherches en intelligence artificielle distribuée et plus précisément sur les systèmes multi-agents tentent de fournir un cadre conceptuel et des outils pour développer des projets pour lesquels il faut simultanément réduire la complexité de conception et modéliser plus fidèlement le réel. Les méthodes de conception sont de types modulaires et incrémentales.

Un système multi-agents peut être métaphoriquement comparé à une ruche d'abeille où chaque individu est assez rudimentaire mais dont l'organisation en société confère à l'ensemble de grandes propriétés comportementales. Une définition large d'un agent, la seule qui fasse à peu près l'unanimité des chercheurs dans ce domaine, a été proposée par Ferber : « Un agent est une entité, réelle ou virtuelle, qui émerge d'un environnement dans lequel il peut réaliser certaines actions, qui est capable de percevoir et de se représenter partiellement son environnement, qui est capable de communiquer avec d'autres agents et qui possède un comportement autonome qui découle de ses observations, ses connaissances et ses interactions avec d'autres agents ». Un agent est un composant logiciel ayant un rôle précis et qui lui est propre. De plus les agents sont dotés de facultés de communication entre eux afin de coordonner leur contribution à la réalisation d'un but global. Chacun des agents peut avoir une implémentation indépendante de celle des autres agents avec lesquels il collabore.

Nwana (1996) propose une typologie des agents : les agents peuvent être classés suivant plusieurs dimensions. Nous en retiendrons deux : le comportement et les facultés.

En ce qui concerne le comportement, les agents qui possèdent un modèle de raisonnement interne et symbolique leur permettant de négocier et de planifier leurs actions afin de les coordonner avec d'autres agents sont appelés agents cognitifs. Par opposition, ceux dont l'action consiste à produire une action directement à la suite de stimuli sont appelés agents réactifs.

Les agents doivent faire preuve de certaines facultés qui ne constituent pas un ensemble nécessaire ni suffisant mais plutôt un minimum : l'autonomie, la coopération et l'apprentissage. L'autonomie fait référence au principe selon lequel un agent peut agir de lui-même, sans avoir recours à une intervention humaine. La coopération avec d'autres agents est une faculté primordiale : c'est la raison d'être des systèmes multi-agents par rapport aux systèmes indépendants. Il s'agit de leur aptitude à communiquer avec d'autres agents afin de collaborer. L'apprentissage est caractéristique d'un système intelligent dans le but d'améliorer ses performances.

Ces distinctions ne sont pas complètes ni définitives mais permettent de poser les enjeux sous-jacents aux systèmes multi-agents.

Une étude plus détaillée de ces systèmes est donnée dans [WOOLDRIDGE ET JENNINGS, 1995] et [NWANA, 1996].

Cette approche semble prometteuse pour des applications aux systèmes tutoriels intelligents, notamment en ce qui concerne des aspects comme l'architecture proprement dite de tels systèmes, ou leur utilisation dans le cadre de l'apprentissage collaboratif. Pour plus de détails, on pourra se référer à [ITS'96].

3.4 Les travaux importants et les perspectives

L'orientation prise dernièrement dans les études et le développement des systèmes d'apprentissage provient d'un intérêt grandissant pour la prise en considération de concepts de psychologie cognitive. Les systèmes d'E.I.A.O. doivent avoir deux buts particuliers [MILECH et coll., 1993] :

1. Communiquer des connaissances (i.e. des règles algorithmiques qui mènent à la méthode optimale de résolution) ;
2. Amener l'apprenant à se représenter et à utiliser ses connaissances de la même manière que l'Expert. Ceci nécessite plus que l'apprentissage des règles de base.

Une approche hybride permet d'intégrer conjointement les méthodes des S.T.I. avec la simulation au sein des logiciels d'apprentissage intelligent. Rivers (1990) prétend que le développement et l'utilisation de jeux permettent de mieux percevoir et aborder les applications ayant un haut degré de complexité.

Cela permet de définir des facteurs critiques dans l'interaction entre l'utilisateur et la simulation afin de centraliser l'intérêt de la conception sur l'utilisateur, les tâches et les stratégies d'apprentissages auxquelles il a recours. Un jeu est plus qu'un modèle du domaine, il inclut la façon dont les joueurs interagissent avec le domaine. Le jeu se focalise sur l'élément humain, c'est-à-dire le joueur et ses performances et permet le développement de ses compétences. Le

prototype accorde beaucoup d'importance à l'interaction entre la personne et la conception de l'artefact. La simulation tire profit de ces deux types d'approches. Par exemple, des travaux tentent de montrer l'impact de la simulation par ordinateur sur la compréhension des notions de base de thermodynamique [LEWIS ET COLL., 1993 ; LEWIS ET LINN, 1994 ; LINN ET SONGER, 1991], notamment au sujet du transfert de chaleur, de l'énergie et de la température. Les auteurs concluent que l'utilisation d'un curriculum qui intègre des expériences scientifiques et la simulation de processus de la vie courante avec un modèle pragmatique des flux de chaleur aboutit à un apprentissage plus robuste et plus cohérent.

Le perfectionnement de l'architecture des S.T.I. est une source de nombreux travaux [FRASSON et coll., 1996 ; LEMAN et coll., 1996]. Les résultats de recherche en psychologie, en médecine ou encore en neurosciences peuvent apporter leur contribution au perfectionnement des logiciels d'apprentissage. L'enseignement stratégique, tel que proposé par Tardif (1992), amène un nouveau courant de pensée dans l'enseignement. L'enseignant stratégique est un penseur et un preneur de décisions qui connaît très bien le contenu du programme qu'il enseigne et les stratégies métacognitives relatives à l'acquisition de ce contenu. L'enseignant doit répertorier les caractéristiques de l'apprenant, ses connaissances antérieures et ses préférences cognitives [TARDIF, 1992]. Nous pensons que la personnalisation de l'apprentissage offerte par les logiciels d'apprentissage vont dans ce sens, et que l'intégration de ces concepts au sein de logiciels d'apprentissage et de transfert de connaissances doivent apporter un crédit encore plus important aux tuteurs intelligents.

L'essor d'Internet et l'ère du multimédia, rendant accessible l'apprentissage à la maison via le *World Wide Web*, offrent aux chercheurs un nouveau champ d'investigations, comme le confirme la section entièrement consacrée au multimédia et au WWW lors de la conférence [ITS'96] [BRUSILOVSKY et coll., 1996 ; ESPINOSA et coll., 1996] et celle consacrée à l'apprentissage coopératif [HEH et coll., 1996 ; BARROS et PERKUSICH, 1996 ; FUJI et coll., 1996 ; AYALA et YANO, 1996] qui tente de transposer le travail en équipe aux STI.

La diversité des contributions à cette conférence montre l'étendue de la recherche sur le thème des systèmes tutoriels intelligents. Outre les deux thèmes cités précédemment, certains prototypes ont

été présentés. Parmi eux, les systèmes multi-agents, les environnements de simulation et de découverte, l'analyse cognitive des tâches de l'apprenant, la modélisation de l'apprenant et l'explicitation des aides.

3.5 Conclusion

Les travaux menés dans le domaine des systèmes informatisés de formation ont amené les auteurs à s'entendre sur une structure en quatre parties qui comprend le module expert, le modèle de l'apprenant, le module tuteur et l'interface. Ces systèmes ne se différencient donc pas par leur architecture, mais bien par les techniques et les moyens mis en œuvre dans la constitution de chacune de ces parties. Nos lectures nous ont montré que, même si l'analyse des représentations mentales revêt une importance grandissante dans les théories de l'apprentissage et du transfert des connaissances, cette préoccupation n'est intégrée que très rarement dans les systèmes informatisés de formation. Il nous semble intéressant d'introduire les résultats de psychologie cognitive dans l'architecture des logiciels d'aide à l'apprentissage. Le chapitre qui suit propose un formalisme qui permet de représenter les modèles mentaux, aussi bien ceux des apprenants que ceux des experts, en situation de résolution de problèmes mathématiquement formalisables.

CHAPITRE 4

LE FORMALISME DE MODÉLISATION DES REPRÉSENTATIONS MENTALES

4.1 Introduction

Si l'on veut pouvoir superviser l'apprentissage d'un étudiant, il faut pouvoir suivre son cheminement lors de la résolution d'un problème. Pour cela, il est nécessaire d'accéder à sa représentation mentale du problème et, d'une manière idéale, à l'idée qu'il se fait du cadre et du domaine dans lequel s'inscrit le problème. Ce chapitre a pour but d'exposer un formalisme permettant de représenter les connaissances intervenant dans la démarche de résolution d'un problème. Ce formalisme doit couvrir les niveaux d'expertise de l'apprenant durant son apprentissage, c'est-à-dire de son stade de Novice à celui d'Expert et doit permettre d'intégrer, d'une manière la plus complète et la plus fidèle possible, tous les constituants intervenant dans le processus cognitif de résolution d'un problème dans un domaine mathématiquement formalisable. Le formalisme que nous proposons porte sur la représentation des modèles mentaux des apprenants et des experts en situation de la résolution de problèmes car, selon Tardif (1992), comme nous l'avons déjà signalé au chapitre 2, les activités de résolution de problèmes sont considérées comme « les activités les plus susceptibles de produire des apprentissages significatifs et permanents chez l'élève, de provoquer et de soutenir le transfert. »

4.2 Le formalisme de représentation des modèles mentaux

La structure retenue pour représenter les modèles mentaux relatifs à la stratégie de résolution d'un problème s'articule autour de la notion de description servant à détailler les différentes étapes qui interviennent lorsqu'un apprenant est en situation de résolution de problèmes. Les descriptions sont définies sous forme de cadres conceptuels [MINSKY, 1975] reliés entre eux par des liens sémantiques [QUILLIAN, 1968]. Développée par Minsky, l'idée de *frames* (cadres conceptuels en français) est d'offrir un support qui permet de regrouper l'ensemble des informations disponibles

sur un concept, un événement ou un acte. L'utilisation de cadres conceptuels pour une base de connaissances présente deux avantages : la compacité et l'organisation. La compacité est due au fait que chaque cadre représente une classe générique d'objets de laquelle des objets spécifiques peuvent être dérivés et instanciés par addition de données spécifiques. L'organisation est obtenue par l'héritage récursif d'information entre des objets reliés et par le fait que chaque cadre peut être regardé comme une entité de connaissance autonome [TANIY ET COLL., 1992].

Le formalisme repose sur trois types de description : des objets, des actions et des dépendances. Un objet peut être une variable du problème (e. g. la vitesse, le périmètre) ou un concept théorique intervenant dans un domaine sans avoir de valeur numérique (e. g. la piste, le coureur). Une action peut être une action de résolution d'une équation, une action de consultation d'une table ou d'un abaque, ou une action d'unification entre deux objets décrits. Une dépendance peut porter sur le déclenchement conditionnel d'une action, quelle qu'elle soit, ou bien sur une propriété physique ou mathématique concernant un objet ou reliant deux objets.

4.2.1 La présentation du formalisme à partir d'un exemple

L'exemple que nous avons choisi pour servir d'illustration tout au long de ce chapitre est volontairement simple. Il s'énonce de la manière suivante :

Quelle est la vitesse moyenne d'un coureur qui couvre un tour de piste circulaire de 100 mètres de rayon en 100 secondes ?

Les descriptions présentées dans la suite sont celles que l'expert a décrites pour rendre compte de son modèle mental correspondant à la résolution du problème qui sert d'exemple.

La stratégie retenue par l'expert pour résoudre ce problème est la suivante :

1. Calculer le périmètre de la piste à l'aide de la relation $p = 2 * \pi * r$
2. Calculer la vitesse moyenne v du coureur à partir de la relation $v = d / t$ en reliant la distance d au périmètre p précédemment calculé.

4.2.2 La liste des items disponibles

L'expert doit mettre à la disposition de l'apprenant une liste des items dans laquelle ce dernier pourra venir choisir ce dont il a besoin pour décrire et résoudre le problème. Nous entendons par items les objets, les actions de résolution et de consultation et les propriétés. Les actions d'unification et les conditions ne sont pas des items, car elles ne relèvent pas de concepts proprement dits. Cette liste doit contenir tous les items utilisés par l'expert ; il peut y ajouter d'autres items, relatifs ou non au problème et au domaine, afin d'introduire «du bruit de fond» dans la liste des items disponibles. La liste des items concernant le problème du coureur est présentée au Tableau 4-1.

TABLEAU 4-1 LA LISTE DES ITEMS DISPONIBLES POUR LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Item
It1	un cercle
It2	un rayon
It3	un périmètre
It4	un corps en mouvement
It5	une vitesse moyenne
It6	un temps
It7	une distance
It8	$v = d / t$
It9	$p = 2 * \pi * r$
It10	$p = \pi * r^2$
It11	$F = m * a$
It12	$p = 4 * a$
It13	une force

Apparaît également dans cette liste le nombre de fois où chaque concept a été instancié par l'expert pour résoudre le problème, cette information, utile lors du processus de validation de la description donnée par l'apprenant, n'est bien évidemment pas accessible à l'apprenant. Les items

en italique constituent le bruit de fond et n'ont donc pas été utilisés par l'expert. Ils sont présentés ici à la suite des items utiles et en italique par simple souci de clarté pour le lecteur. En réalité, cette liste ne doit pas laisser paraître la pertinence ou l'inutilité d'un item pour la résolution du problème.

4.2.3 La description d'un objet

Un objet représente soit un concept qui n'a pas de valeur numérique, soit une variable, intervenant dans le processus de résolution du problème. Dans le cas du problème du coureur, les objets à décrire sont : le coureur, la piste, la vitesse moyenne du coureur, le rayon de la piste, le périmètre de la piste, le temps de course et la distance parcourue. La description complète de ces objets est présentée au Tableau 4-2

Un objet est défini à l'aide de sept facettes:

- **Identificateur (Id.)** : identificateur⁶ de l'objet décrit;
- **Objet** : chaîne de caractères décrivant l'objet, c'est le nom de l'instance dérivant de l'item;
- **Sorte de (Sde)** : lien sémantique indiquant l'item dont cet objet est une instance;
- **Partie de (Pde)** : lien sémantique servant à relier l'objet à celui dont il est une partie constituante;
- **Provenance** : lien sémantique indiquant la manière dont les facettes **Valeur** et **Unité** de cet objet ont été obtenues (énoncé ou identificateur de l'action correspondante);
- **Valeur** : valeur numérique de l'objet;
- **Unité** : unité dans laquelle la valeur numérique est à considérer.

⁶ L'identificateur est unique et doit être généré automatiquement par le logiciel lors de la saisie de la description : E pour Expert ou A pour Apprenant, suivi de Obj pour objet, Res pour action de résolution, Csl pour action de consultation, Uni pour action d'unification, Cdt pour condition ou Pro pour propriété. Enfin, il se termine par un numéro d'ordre.

TABLEAU 4-2 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj1	la piste	It1				
EObj2	le rayon	It2	EObj1	Énoncé	100	m
EObj3	le périmètre	It3	EObj1	ERes1		
EObj4	le coureur	It4				
EObj5	la vitesse	It5	EObj4	ERes2		
EObj6	le temps	It6	EObj4	Énoncé	100	s
EObj7	la distance	It7	EObj4	EUni1		

4.2.4 La description des actions

On distingue trois sortes d'action intervenant dans la stratégie de résolution d'un problème : les actions de résolution, les actions de consultation et les actions d'unification.

4.2.4.a La description d'une action de résolution

Une action de résolution permet de décrire la relation qui relie plusieurs items entre eux par une équation mathématique ou logique. Les actions nécessaires à la résolution du problème du coureur sont données au Tableau 4-3.

Une action de résolution est décrite en cinq facettes:

- **Identificateur (Id.)** : identificateur⁶ de l'action de résolution décrite;
- **Relation** : intitulé de la relation tel qu'il apparaît dans la liste des items;
- **Sorte de (Sde)** : lien sémantique indiquant l'item dont cette action de résolution est une instance;
- **[Associations]** : liste des variables de la relation en association avec les objets utilisés pour le problème;
- **Dépendance** : lien sémantique indiquant la dépendance qui détermine le déclenchement de l'action de résolution. Cette facette reste vide si le déclenchement de l'action est indépendant.

TABLEAU 4-3 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dépendance
ERes1	$p = 2 * \pi * r$	It9	[p = EObj3, r = EObj2]	
ERes2	$v = d / t$	It8	[v = EObj5, d = EObj7, t = EObj6]	

4.2.4.b La description d'une action de consultation

Une action de consultation permet, à partir d'un ou de plusieurs objets d'en déterminer un autre (ou plusieurs autres) par la lecture d'une table ou d'un abaque. Aucune action de consultation n'est nécessaire dans le problème du coureur. Ce type de description est illustré dans le chapitre 7, pour le problème de thermodynamique.

Une action de consultation est décrite en six facettes:

- **Identificateur (Id.)** : identificateur⁶ de l'action de consultation décrite;
- **Ressource** : nom de la ressource à consulter (nom de la table ou de l'abaque);
- **Sorte de (Sde)** : lien sémantique indiquant l'item dont cette action de consultation est une instance;
- **[Entrées]** : lien sémantique indiquant la liste des objets déterminant les variables d'entrée de la ressource;
- **Sortie** : lien sémantique indiquant l'objet résultant de la consultation de la ressource;
- **Dépendance** : lien sémantique indiquant la dépendance qui détermine le déclenchement de l'action de résolution. Cette facette reste vide si le déclenchement de l'action est indépendant.

4.2.4.c La description d'une action d'unification

Une action d'unification sert à déterminer un objet par une relation simple (égalité, ou multiple) appliquée à un autre objet. Une action d'unification pour le problème du coureur est décrite au Tableau 4-4.

TABLEAU 4-4 L'ACTION D'UNIFICATION UTILISÉE PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dépendance
EUn1	EObj3	EObj7	égalité	

Une action d'unification est décrite en cinq facettes:

- **Identificateur (Id.)** : identificateur⁶ de l'action d'unification;
- **Connu** : lien sémantique indiquant l'objet connu servant de source à l'unification;
- **Affecté** : lien sémantique indiquant l'objet inconnu servant de cible à l'unification;
- **Relation** : relation servant à déterminer le rapport entre les objets unifiés (quart, tiers, moitié, égalité, opposé, double, triple ou quadruple);
- **Dépendance** : lien sémantique indiquant la dépendance qui détermine le déclenchement de l'action d'unification. Cette facette reste vide si le déclenchement de l'action est indépendant.

4.2.5 La description des dépendances

On distingue deux types de dépendance : la *condition*, qui traduit une opération logique conditionnant le déclenchement d'une action ou l'état d'une propriété et la *propriété* qui confère à un objet une caractéristique particulière ou relie deux objets par une propriété spécifique.

4.2.5.a La description d'une condition

Une condition conduit à évaluer une expression logique à partir de deux objets ou de deux dépendances qui jouent le rôle d'opérandes d'un opérateur logique. Aucune condition n'est nécessaire dans le problème du coureur. Ce type de description est illustré dans le chapitre 7, pour le problème de thermodynamique et le problème de l'équation du second degré.

Une condition est décrite en cinq facettes.

- **Identificateur (Id.)** : identificateur⁶ de l'action d'unification;
- **1^{er} opérande** : lien sémantique indiquant l'objet ou la dépendance qui est l'opérande de gauche de l'opérateur;
- **Opérateur** : opérateur logique ou relationnel;

- **2^e opérande** : lien sémantique indiquant l'objet ou la dépendance qui est l'opérande de droite de l'opérateur;
- **État** : état du résultat de l'évaluation de l'expression logique (vrai, faux ou indéterminé).

4.2.5.b *La description d'une propriété*

Une propriété permet d'attribuer à un objet une caractéristique particulière, ou d'unir deux objets par une caractéristique particulière. Aucune propriété n'est nécessaire dans le problème du coureur. Ce type de description est illustré dans le chapitre 7, pour le problème du triangle.

Une propriété est décrite en sept facettes.

- **Identificateur** : identificateur⁶ de l'action d'unification;
- **Propriété** : chaîne de caractères permettant d'identifier la propriété;
- **Sorte de (Sde)** : lien sémantique indiquant l'item dont cette propriété est une instance;
- **1^{er} objet** : lien sémantique indiquant l'objet sur lequel porte la propriété;
- **2^e objet** : lien sémantique indiquant un autre objet, si nécessaire, relié au premier par la propriété;
- **Provenance** : lien sémantique indiquant la manière par laquelle la facette **État** de cette propriété est obtenue (énoncé ou identificateur de la condition correspondante);
- **État** : état de la propriété (vrai, faux, indéterminé).

4.3 Commentaires

La tâche de présentation du problème que l'on souhaite voir résoudre par l'apprenant incombe à l'expert. Elle consiste à formuler l'énoncé du problème de manière textuelle et à l'accompagner d'une figure si nécessaire afin de décrire la nature du problème, ainsi que les variables nécessaires et éventuellement leur valeur. En fait, l'énoncé d'un problème s'apparente tout à fait à celui que l'on peut trouver dans un recueil de problèmes. L'expert doit également dresser une liste d'items mise à la disposition de l'apprenant pour décrire sa stratégie de résolution du problème posé.

L'expert doit élaborer la liste des items avec un très grand soin ainsi qu'un souci d'exactitude et de complétude cognitives. Il peut se faire seconder par un cogniticien afin de s'assurer qu'il n'a

pas omis de décrire des connaissances auxquelles il a recours de manière automatique sans en avoir conscience.

Au départ, nous voulions laisser l'apprenant totalement libre de ses choix lors de la description de sa démarche de résolution. Nous souhaitions donc nous affranchir de toute liste dans laquelle l'apprenant peut sélectionner les concepts et les actions auxquels il a recours, et ceci dans le souci de ne pas influencer sa démarche en intervenant au minimum. Mais, après mûres réflexions, l'utilisation de listes pour la présentation des connaissances déclaratives nous paraît beaucoup plus naturelle. En effet, comme nous l'avons vu au chapitre 2, un apprenant en situation de résolution de problème procède à une exploration de ses connaissances déclaratives avant d'y sélectionner celles qu'il pense utiles. Le processus de choix dans une liste s'apparente à ce processus.

Le problème du coureur, quoique simple, peut être résolu de plusieurs manières (par exemple, le périmètre peut être calculé directement à l'aide du rayon, ou bien en introduisant le diamètre). La diversité de stratégies de résolution est fréquente dans les problèmes, et elle augmente avec la complexité des problèmes. Le concepteur du logiciel ne doit pas privilégier une stratégie plutôt qu'une autre car cette tâche incombe à l'expert en didactique du domaine. De plus, il est préférable de ne pas faire figurer dans le « bruit de fond » les items utilisés dans une stratégie non souhaitée par l'expert. Par exemple, il serait maladroit d'y faire apparaître les items « un diamètre » et « $p = \pi * D$ », si la solution privilégiée passe par l'utilisation du rayon. Car l'apprenant pourrait donner une description correcte, menant à la même solution numérique que celle donnée par l'expert, mais il serait très difficile d'établir la justesse de la réponse, du fait de la non concordance entre les deux descriptions. En effet, le processus de validation ne pourrait pas établir la concordance entre un objet qui provient de l'item « un diamètre » et un objet qui provient de l'item « un rayon ». Il ne pourrait pas non plus établir la concordance entre les actions de résolution qui proviendraient, elles aussi, d'items différents. Ni le formalisme ni le processus ne peuvent savoir que ces solutions reviennent au même, car il leur manque la connaissance, qui pour nous est implicite, liant les concepts de rayon et de diamètre. C'est pourquoi les items qui constituent le bruit de fond doivent être choisis judicieusement.

4.4 Synthèse

Ce formalisme fait intervenir de nombreux métaconcepts nécessaires à la description de la résolution d'un problème. Ceux-ci ont été regroupés sous forme de cadres conceptuels reliés par des liens sémantiques, comme le montre la Figure 4-1. C'est sous cette forme que le formalisme a été implanté informatiquement à l'aide de la surcouche Flex du langage Prolog [LPA, 1996a et LPA, 1996b].

Chaque rectangle représente un métaconcept. Les flèches épaisses symbolisent des liens de spécialisation éventuelle : par exemple, une action peut être soit une action d'unification, soit une action de résolution, soit une action de consultation. Les flèches fines symbolisent des liens d'attribution pour le métaconcept dont elle fait partie : par exemple, tout objet a une Provenance. Ces attributs (ou facettes) sont propagés par les liens de spécialisation. Ainsi, une condition, qui a les attributs Opérande1, Opérateur et Opérande2, hérite de l'attribut État, car c'est une spécialisation d'une dépendance et hérite également de l'attribut Identificateur, car une dépendance est une spécialisation d'une description. Les flèches en pointillés symbolisent les domaines dans lesquels les attributs prennent leur valeur. On peut définir un domaine de deux façons différentes : en compréhension, c'est-à-dire que le type est donné par un nom générique représentant le nom de l'ensemble, e.g. **RÉEL** désigne l'ensemble des nombres réels ; ou en extension, c'est-à-dire en donnant la liste exhaustive des valeurs que peut prendre la facette. Les types en extension sont donnés dans un « rectangle aux coins arrondis » et les types en compréhension sont donnés en lettres capitales et en caractères gras. Les types **ITEM**, **OBJET**, **ACTION**, **DÉPENDANCE**, **CONDITION** et **PROPRIÉTÉ** représentent chacun la liste des identificateurs des descriptions utilisées dans leur catégorie respective. Les types mis entre crochets correspondent à une liste d'éléments du type indiqué.

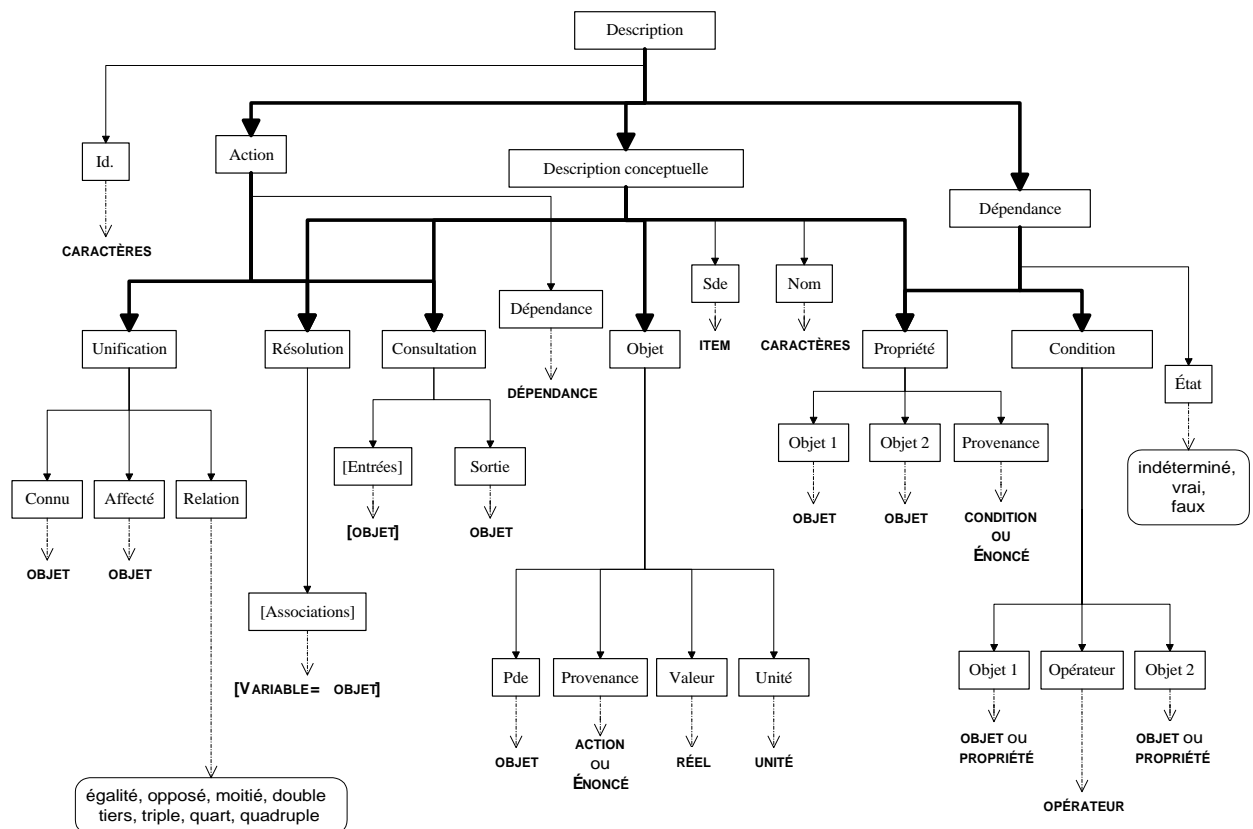


Figure 4-1 L'organisation des métaconcepts intervenant dans le formalisme

La Figure 4-2 reprend, en sept tableaux (T1 à T7), le formalisme de représentation du modèle mental appliqué au problème du coureur. Cette figure servira de référence pour les processus de validation des représentations mentales au chapitre 5.

Id.	Item
It1	un cercle
It2	un rayon
It3	un périmètre
It4	un corps en mouvement
It5	une vitesse moyenne
It6	un temps
It7	une distance
It8	$v = d / t$
It9	$p = 2 * \pi * r$

T1 : items disponibles

Id.	Objet	Sde	Pde	Prov.	Valeur	Unité
EObj1	la piste	It1				
EObj2	le rayon	It2	EObj1	Énoncé	100	m
EObj3	le périmètre	It3	EObj1	ERes1		
EObj4	le coureur	It4				
EObj5	la vitesse	It5	EObj4	ERes2		
EObj6	le temps	It6	EObj4	Énoncé	100	s
EObj7	la distance	It7	EObj4	EUn1		

T2 : objets

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ERes1	$p = 2 * \pi * r$	It9	[p = EObj3, r = EObj2]	
ERes2	$v = d / t$	It8	[v = EObj5, d = EObj7, t = EObj6]	

T3 : actions de résolution

Id.	Ressource	Sde	[Entrées]	Sortie	Dép.

T4 : action de consultation

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dép.
EUn1	EObj3	EObj7	égalité	

T5 : action d'unification

Id.	1 ^{er} Opérande	Opérateur	2 ^e Opérande	État

T6 : condition

Id.	Propriété	Sde	1 ^{er} Objet	2 ^e objet	Prov.	État

T7 : propriété

Figure 4-2 Le formalisme de représentation du modèle mental, appliqué au problème du coureur

CHAPITRE 5

LE PROCESSUS DE VALIDATION DE LA DESCRIPTION FAITE PAR L'APPRENANT

5.1 Introduction

Dans le processus de validation, nous supposons que la représentation de l'apprenant et celle de l'expert ont été élaborées sous la forme que nous avons décrite au chapitre précédent. Après avoir présenté une vue d'ensemble de ce processus de validation, nous détaillerons chacune des ces parties constitutives.

La Figure 5-1 présente l'organigramme de l'ordonnancement des tâches qui entrent en jeu dans le processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant, comme nous l'envisageons. Ce processus se déroule en trois étapes sous forme cyclique : l'évaluation de la cohérence de la représentation mentale de l'apprenant, l'exécution de cette représentation, et l'évaluation de la concordance de cette représentation avec celle donnée par l'expert.

La première étape consiste à analyser la description faite par l'apprenant et vérifie si celle-ci est cohérente, c'est-à-dire si les descriptions faites (objets, actions et dépendances) peuvent s'imbriquer les unes dans les autres et si finalement cette construction conduit quelque part. Le bon accomplissement de cette étape est indispensable à la poursuite du processus de validation.

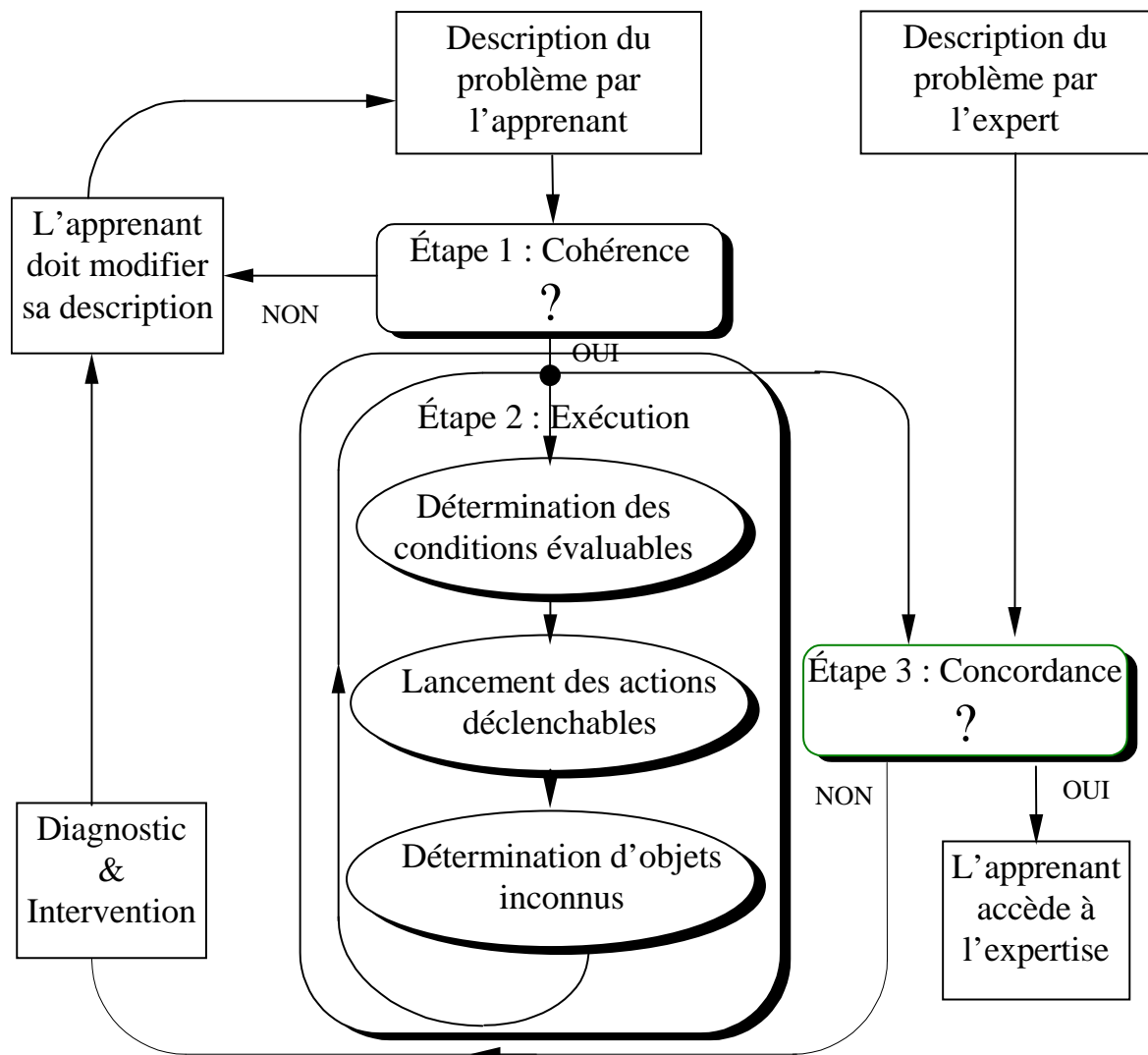


Figure 5-1 Le processus de validation de la description faite par l'apprenant

La deuxième étape consiste à exécuter la description faite par l'apprenant en déclenchant les actions qui peuvent l'être. Cette étape comprend trois sous-étapes : la détermination des conditions évaluables, le lancement des actions déclenchables et la détermination d'objets inconnus.

La troisième étape du processus d'évaluation cherche à établir la concordance entre la description donnée par l'expert et celle donnée par l'apprenant. Pour ce faire, on essaye d'apparier les objets,

les conditions et les actions décrits par l'apprenant d'une part avec ceux décrits par l'expert d'autre part.

Si des différences sont détectées entre les deux représentations mentales, une intervention est proposée pour aider l'apprenant à corriger sa mauvaise représentation. Ces interventions sont détaillées par l'expert qui a défini le problème.

5.2 L'évaluation de la cohérence (étape 1)

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, un « bon » modèle mental doit faire preuve de cohérence interne. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de contradiction et ni d'ambiguïté. En ce qui concerne le formalisme, la cohérence ne concerne que le scénario de résolution de l'apprenant ; il va sans dire qu'il n'est pas de notre ressort de remettre en cause le modèle mental de l'expert. Il s'agit donc de regarder si la description du problème faite par l'apprenant est complète, correcte et non ambiguë. Les informations données par l'apprenant au sujet d'une description (i.e. une ligne dans un des tableaux de la Figure 4-2) doivent avoir du sens relativement à la description complète du problème.

Voici les tests de cohérence qui sont évalués :

- Un objet décrit doit être utilisé dans une autre description (T2 dans T3, T4, T5, T6 ou T7).
- Les objets utilisés dans une description doivent être décrits (T3, T4, T5, T6 et T7 dans T2).
- Pour un objet, au moins une des deux facettes **Provenance** ou **Partie de** doit être remplie (T2).
- Si un objet provient d'une action, une description doit exister pour cette action (T2 dans T3, T4 ou T5).
- Si un objet est décrit comme faisant partie d'un autre objet, une description doit exister pour l'objet englobant (T2).
- Si la provenance d'un objet est « Énoncé », les facettes **Valeur** et **Unité** de cet objet doivent être remplies (T2).
- Une action décrite doit être utilisée comme provenance d'un objet (T3, T4 et T5 dans T2).
- Si une action est dépendante, une description de la dépendance correspondante doit exister (T3, T4 et T5 dans T6 ou T7).

- Une dépendance décrite doit être utilisée comme condition de déclenchement d'une action ou comme provenance d'une propriété (T6 et T7 dans T3, T4, T5 ou T7).
- Si la provenance d'une propriété est « Énoncé », la facette **État** de cette propriété doit être remplie (T7).
- Un objet ne peut être **Partie de** lui-même (T2).
- Dans les conditions entre deux objets, l'opérateur doit être de type relationnel (i.e. >, >=, <, <=, ==, !=) (T6).
- Dans les conditions entre deux dépendances, l'opérateur doit être de type logique (i.e. et, ou, non) (T6).

La cohérence peut être vérifiée via l'interface, au moment où l'apprenant communique au logiciel sa description du problème (en termes d'objets, d'actions et de dépendances). Cependant, comme nous présumons que la description de l'apprenant a pu être acquise et représentée selon notre formalisme, nous avons repris ci-dessus, pour mémoire, les tests qu'il est nécessaire d'effectuer.

5.3 L'exécution de la description (étape 2)

Le formalisme de représentation des modèles mentaux présenté au chapitre 4 a été conçu de façon à ce qu'il contienne les descriptions nécessaires à la résolution du problème. La structure de ces descriptions permet de déterminer l'ordre dans lequel les actions doivent être déclenchées. Un moteur peut donc, à partir du formalisme, enchaîner les actions si leur description le permet. Ce moteur tourne selon un cycle à trois sous-étapes : la détermination des dépendances évaluables (T6 et T7), le lancement des actions déclenchables (T3, T4 et T5) et la détermination d'objets inconnus (report dans T2). Les cycles se suivent en chaînage avant, c'est-à-dire que si un tour de cycle permet de compléter une description, en trouvant la valeur d'un objet ou l'état d'une dépendance, un nouveau cycle lui succède pour essayer d'utiliser cette description. Si un cycle ne modifie aucune description, le moteur s'arrête car la représentation donnée par l'apprenant a été menée à bout. Afin d'illustrer les mécanismes qui interviennent dans l'exécution d'une représentation mentale, nous reprendrons, à titre d'exemple, le problème exposé à la section 4.2.1 pour détailler les cycles du moteur d'inférences.

5.3.1 La détermination des dépendances évaluables (T6 et T7 selon T2)

Une dépendance est dite évaluable si sa facette **État** est « Indéterminée » et si les deux opérandes sont déterminés, c'est-à-dire que leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont non vides. Si la facette **État** de la dépendance est « Vrai » ou « Faux », on dit alors que la dépendance est déjà déterminée.

La détermination d'une dépendance évaluable consiste à fixer la valeur de sa facette **État** et se fait de manière différente selon la nature de la dépendance. S'il s'agit d'une condition, la détermination de la facette **État** provient du résultat de l'application de la facette **Opérateur** aux facettes **1^{er} opérande** et **2^e opérande**. La facette **État** provient donc du résultat logique de l'affectation suivante :

$$\langle \text{État} \rangle \leftarrow \langle 1^{\text{er}} \text{ opérande} \rangle \langle \text{opérateur} \rangle \langle 2^{\text{e}} \text{ opérande} \rangle$$

S'il s'agit d'une propriété, la détermination de la facette **État** s'effectue par simple copie de la facette **État** de la condition servant de **Provenance** à la propriété. La facette **État** passe donc de « Indéterminé » à « Vrai » ou « Faux » selon le cas.

5.3.2 Le lancement des actions déclenchables (T3, T4 et T5 selon T2)

De manière générale, une action, quel que soit son type (résolution, consultation ou unification) ne peut être déclenchable que si sa facette **Dépendance** est vide (on parle alors d'action indépendante), ou bien si sa facette **Dépendance** fait référence à une dépendance dont la facette **État** est fixée à « Vrai ». Cette condition est nécessaire mais non suffisante. En effet, une condition supplémentaire s'ajoute suivant le type de l'action : pour une action de résolution, il faut en plus que sa facette **[Associations]** ne contienne qu'un seul objet indéterminé, c'est-à-dire un seul objet dont les facettes **Valeur** et **Unité** sont vides ; pour une action de consultation, il faut que sa facette **[Entrées]** ne contienne aucun objet indéterminé et pour une action d'unification il faut que l'objet de la facette **Connu** soit effectivement déterminé.

Le lancement d'une action déclenchable se fait de différentes manières selon le type de l'action. Le lancement d'une action de résolution déclenchable s'effectue en ayant recours à un solveur

d'équations à une inconnue que nous avons mis au point. Les calculs sont effectués conformément au système international. Le lancement d'une action de consultation déclenchable se fait par simple association de valeurs tabulées, à partir de la facette [**Entrées**], vers la facette **Sortie**. Le lancement d'une action d'unification déclenchable est une simple détermination de la facette **Affecté** à partir de la facette **Connu** en appliquant le facteur correspondant de la facette **Relation**.

5.3.3 La détermination de nouveaux objets (report dans T2)

Comme nous venons de le voir, le lancement d'une action déclenchable permet de déterminer des objets jusqu'alors inconnus. La détermination de nouveaux objets consiste à rendre effectifs les effets de bord produits sur ces objets en modifiant les facettes **Valeur** et **Unité** au sein de leur description respective.

5.3.4 Un exemple d'exécution

Pour le problème du coureur, l'expert n'a décrit aucune dépendance. Le moteur passe donc directement à l'étape de déclenchement des actions.

L'expert a décrit trois actions pour le problème du coureur : deux actions de résolution et une action d'unification. Le moteur procède action par action, en commençant par les actions de résolution, puis les actions de consultation et en fin, les actions d'unification. Il commence donc par l'action ERes1. Comme le montrent les tableaux T3 et T5, aucune de ces trois actions n'est dépendante. Cette action étant une action de résolution, elle est déclenchable si elle ne contient qu'une inconnue. Le moteur doit simplement évaluer le nombre d'objets inconnus dans l'équation. La facette [**Associations**] de cette action est la suivante : [p=EObj3, r=EObj2]. Le moteur prend chaque objet qui apparaît dans cette liste et cherche dans la liste des objets si sa valeur et son unité sont connues. Ce n'est pas le cas pour EObj3 mais, par contre, c'est le cas pour EObj2 : sa valeur est 100 et son unité est m. Le moteur déduit qu'il peut déclencher l'action, car l'équation à résoudre ne comporte qu'une seule inconnue. Le moteur soumet le déclenchement de l'action Eres1 au solveur d'équation, qui détermine la valeur et l'unité de EObj3. Ce nouvel objet venant d'être déterminé, ses facettes Valeurs et Unités peuvent être mises à jour dans la liste des

objets afin d'être utilisées ultérieurement. La nouvelle description de l'objet EObj3 est présentée à la première ligne du Tableau 5-1.

Le moteur poursuit avec la deuxième action de résolution : ERes2. La facette [**Associations**] de cette action est la suivante : [v=EObj5, d=EObj7, t=EObj6]. Le moteur trouve dans cette liste deux objets dont les facettes **Valeur** et **Unité** sont inconnues : EObj5 et EObj7. L'objet EObj6 (le temps) est connu. Le moteur ne peut donc pas soumettre le déclenchement de cette action au solveur d'équation. Il poursuit en essayant de déclencher l'action d'unification EUni1. Pour que cette action soit déclenchable, il faut que sa facette **Connu** fasse référence à un objet effectivement connu. La facette **Connu** de EUni1 est EObj3, le moteur consulte la liste des objets et constate que les facettes **Valeur** et **Unité** de la description EObj3 sont connues (elles ont été déterminées à la suite du déclenchement de l'action ERes1). Le moteur effectue donc l'unification en appliquant la relation contenue dans la facette **Relation** de l'action EUni1 à l'objet contenu dans la facette **Connu** et détermine ainsi les facettes **Valeur** et **Unité** de l'objet contenu dans la facette **Affecté** de l'action EUni1. Le moteur procède à la mise à jour de la description de l'objet affecté dans la liste des objets en reportant la valeur et l'unité dans les facettes appropriées. À la suite du déclenchement de l'action d'unification EUni1, la nouvelle description de l'objet EObj7 est présentée à la deuxième ligne du Tableau 5-1.

Le cycle s'achève puisque toutes les actions ont été explorées. Comme au moins une description a été modifiée (en fait 2 : EObj3 et EObj7), le moteur repart pour un nouveau cycle afin de tenter de déclencher des actions qui n'ont pas pu l'être au cycle précédent. Le moteur réessaye donc de déclencher l'action de résolution ERes2. Sa facette [Association] ne contient maintenant plus qu'une inconnue qui est l'objet EObj5, puisque l'objet EObj7 a été déterminé au cycle précédent. Le moteur soumet donc l'action Eres2 au solveur qui isole et détermine la valeur et l'unité de l'objet EObj5. Le moteur procède ensuite à la mise à jour des facettes **Valeur** et **Unité**. La nouvelle description de cet objet est présentée à la troisième ligne du Tableau 5.1.

TABLEAU 5-1 LA DÉTERMINATION DE EObj3, EObj7 ET EObj5 POUR LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj3	le périmètre	It3	EObj1	ERes1	628,32	<i>m</i>
EObj7	la distance	It7	EObj4	EUni1	628,32	<i>m</i>
EObj5	la vitesse	It5	EObj4	ERes2	6,2832	<i>m/s</i>

Le moteur s'arrête puisque toutes les actions ont été déclenchées.

5.4 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales (étape 3)

La concordance est la comparaison entre la description du problème vue par l'apprenant et celle vue par l'expert. L'évaluation de la concordance produit un diagnostic sur le degré de similitude entre la description donnée par l'expert et celle faite par l'apprenant. Contrairement à l'évaluation de la cohérence, il ne s'agit pas de détecter une ou des erreurs mais bien d'essayer d'identifier les concepts utilisés par l'apprenant et de les mettre, lorsque c'est possible, en relation avec ceux utilisés par l'expert.

L'analyse de la concordance se fait à partir des items. Les descriptions utilisées par l'expert et celles utilisées par l'apprenant sont regroupées par item. Si plusieurs descriptions dérivent du même item, l'algorithme génère toutes les combinaisons possibles. L'algorithme dresse ainsi des paires de candidats pour lesquelles il faut essayer d'établir la concordance.

5.4.1 La génération d'hypothèses et de supputations

Il se peut que des items aient été utilisés par l'expert et non par l'apprenant ou vice versa, ou encore que les mêmes items soient utilisés des nombres de fois différents par l'un et par l'autre. Si c'est le cas, ceci est détecté lors de l'élaboration de la liste des candidats et le système est amené à générer des hypothèses de confusions. Ces hypothèses dépendent des items en cause et du nombre de fois où ils sont utilisés ou non. Ultérieurement, certaines concordances pourront être déduites sous réserve de ces hypothèses. Par exemple, si dans le cas du problème du coureur, l'apprenant a calculé le périmètre à partir de l'équation $p = \pi * r^2$ au lieu de $p = 2 * \pi * r$, le système détecte qu'un item a été utilisé par l'expert alors que l'apprenant ne l'utilise pas. Par

contre l'apprenant utilise un item que l'expert n'a pas utilisé. Comme nous le voyons dans le chapitre consacré aux exemples, le système génère l'hypothèse selon-laquelle il y a eu confusion de la part de l'apprenant entre ces deux actions de résolution et cherche à établir la concordance des autres descriptions sous réserve de cette hypothèse (*cf.* chapitre 7).

De plus, l'expert peut utiliser N_e instances d'un item tandis que l'apprenant peut utiliser N_a instances du même item (supposons $N_e = N_a + 1$). Dans ce cas, l'algorithme va conclure qu'au moins une instance de l'item proposée par l'expert est isolée, suite à quoi, l'algorithme émet des hypothèses de niveau inférieur, que nous avons nommées *supputations*. Nous parlons de niveau inférieur, car ces *supputations* ne peuvent pas être directement utilisées pour établir des concordances. Ces *supputations* coexistent tant que la concordance d'un de ces objets n'a pas été établie. Lorsque la concordance d'un objet impliqué dans une *supputation* vient d'être établie, la *supputation* portant sur cet objet est supprimée, car ce dernier ne risque plus d'être isolé. À la fin de chaque cycle, l'algorithme balaye les *supputations* par items et, dans le cas où il ne reste plus qu'une *supputation* portant sur un item, cette *supputation* est promue au niveau d'hypothèse qui pourra être utilisée ultérieurement pour établir de nouvelles concordances.

5.4.2 Les règles de concordance

Ensuite, pour chaque paire d'objets candidats à la concordance, le système tente de déclencher les règles de concordance entre deux objets en chaînage arrière et en profondeur d'abord sur les différentes facettes. Il y a des règles de concordance pour chaque type de descriptions : les objets, les actions de résolution, de consultation et d'unification, les conditions et les propriétés. Ces règles se présentent de la manière suivante :

- Règles de concordance entre deux objets

1. Deux objets qui constituent une paire de candidats AObj⁷ et EObj, dont les provenances sont « Énoncé », concordent si leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont égales deux à deux (ConcObj1).
2. Deux objets qui constituent une paire de candidats AObj et EObj, dont les provenances ne sont ni vides ni « Énoncé », concordent si les actions dont ils proviennent concordent (ConcObj2).
3. Deux objets qui constituent une paire de candidats AObj et EObj, dont les provenances sont vides, concordent si la concordance de tous les objets AObj_i et EObj_j étant respectivement des parties constitutantes de AObj et EObj, a été préalablement établie (ConcObj3).

- Règles de concordance entre deux actions

- Règle de concordance entre deux actions de résolution

Deux actions de résolution ARes et ERes concordent si leurs facettes [**Associations**] comportent des objets qui concordent deux à deux.

- Règle de concordance entre deux actions de consultation

Deux actions de consultation ACsl et ECsl concordent si leur facette [**Entrées**] comportent des objets qui concordent deux à deux et si les objets de leur facette **Sortie** concordent également.

- Règle de concordance entre deux actions d'unification

⁷ Nous rappelons que l'identificateur d'une description est unique et doit être généré automatiquement par le logiciel lors de la saisie de la description : E pour Expert ou A pour Apprenant, suivi de Obj pour objet, Res pour action de résolution, Csl pour action de consultation, Uni pour action d'unification, Cdt pour condition ou Pro pour propriété. Enfin, il se termine par un numéro d'ordre.

Deux actions d'unification AUni et EUni concordent si les objets de leur facette **Connu** concordent et si ceux de leur facette **Affecté** concordent également entre eux.

- Règles de concordance entre deux dépendances
 - Règle de concordance entre deux conditions
Deux conditions ACdt et ECdt concordent si les objets de leur facette **Opérande1** concordent, si ceux de leur facette **Opérande2** concordent également et si les opérateurs sont identiques.
 - Règle de concordance entre deux propriétés
Deux propriétés APro et EPro concordent si les objets de leur facette **Obj1** concordent, si ceux de leur facette **Obj2** concordent et si les facettes **Provenance** concordent également.

Lorsque la concordance entre deux descriptions vient d'être établie, l'algorithme élimine de la liste des candidats toutes les paires contenant les objets dont la concordance vient d'être établie.

5.4.3 L'élimination de la récursivité introduite par les règles de concordance

À la lecture de ces règles, on se rend compte que leur déclenchement introduit une récursivité qui risque de devenir inextricable. En effet, pour prouver la concordance entre deux objets, il faut prouver la concordance entre les actions dont ils proviennent (troisième règle concernant les objets). Or, ces actions font forcément référence aux objets dont on veut initialement prouver la concordance. Ce qui revient à dire que, pour que les actions concordent, il faut que les objets concordent. Nous brisons ce cercle vicieux de la manière suivante : lorsque l'on est en train d'essayer d'établir la concordance entre deux descriptions, on ne considère plus ces deux descriptions dans la suite et ceci jusqu'à ce qu'on en ait terminé avec ces deux descriptions.

5.4.4 Un exemple d'évaluation de la concordance entre deux représentations mentales

Afin d'éclaircir cet algorithme, reprenons l'exemple utilisé pour illustrer le Chapitre 4. Pour cela, supposons que la représentation mentale de l'apprenant soit telle qu'elle est traduite dans le Tableau 5-2, le Tableau 5-3 et le Tableau 5-4.

TABLEAU 5-2 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj1	le coureur	It4				
AObj2	d	It7	AObj1	AUni1		
AObj3	t	It6	AObj1	Énoncé	100	s
AObj4	v	It5	AObj1	ARes1		
AObj5	la piste	It1				
AObj6	r	It2	AObj5	Énoncé	100	m
AObj7	p	It3	AObj5	ARes2		

TABLEAU 5-3 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dépendance
ARes1	$v = d / t$	It8	$[v = \text{AObj4}, d = \text{AObj2}, t = \text{AObj3}]$	
ARes2	$p = 2 * \pi * r$	It9	$[p = \text{AObj7}, r = \text{AObj6}]$	

TABLEAU 5-4 L'ACTION D'UNIFICATION UTILISÉE PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU COUREUR

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dépendance
AUni1	AObj7	AObj2	égalité	

Dans ce problème, chaque item est instancié une seule fois et les mêmes items ont été instanciés le même nombre de fois, par l'apprenant et par l'expert. La liste des candidats à l'évaluation de la concordance s'établit donc simplement comme le présente le Tableau 5-5.

TABLEAU 5-5 LA LISTE DES CANDIDATS À L'ÉVALUATION DE LA CONCORDANCE POUR LE PROBLÈME DE DU COUREUR

Item	App.	Exp.
It1	AObj5	EObj1
It2	AObj6	EObj2
It3	AObj7	EObj3
It4	AObj1	EObj4
It5	AObj4	EObj5
It6	AObj3	EObj6
It7	AObj2	EObj7

Le moteur débute donc en essayant d'établir la concordance entre les deux objets constituant la première paire de candidats, soit AObj5 et EObj1 (la description de l'expert à laquelle il est fait référence ici est celle présentée pour illustrer le chapitre 4). Le moteur évalue les règles concernant la concordance d'objets : les provenances de EObj1 et AObj5 sont vides donc la seule règle applicable est la troisième (ConcObj3). Pour pouvoir déduire la concordance des objets EObj1 et AObj5, il faut que tous les objets qui sont des parties constituantes de EObj1 (soit EObj2 et EObj3) concordent avec un objet étant partie constituante de AObj5 (soit AObj6 et AObj7). Or, comme aucune concordance n'a été établie la règle ne peut conduire à la concordance entre EObj1 et AObj5. La paire de candidats suivante est AObj6 et EObj2. Ces deux objets provenant de l'énoncé, la première règle (ConcObj1) peut être appliquée : les deux objets

concordent, car leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont égales (respectivement 100 et m). Le moteur vient de prouver la concordance entre AObj6 et EObj2. Ces deux objets sont retirés de la liste des candidats. Le moteur poursuit en tentant d'évaluer la concordance de la paire de candidats suivante, soit AObj7 et EObj3. Leur provenance n'étant ni « Énoncé » ni vide, la seule règle applicable est la deuxième (ConcObj2) : deux objets concordent si leur provenance concordent, c'est-à-dire que AObj7 et EObj3 concordent si ARes2 et ERes1 concordent. Le moteur part en profondeur d'abord pour établir la concordance de ces deux actions de résolution, sans oublier que le but premier est de prouver la concordance entre AObj7 et EObj3. Le moteur tente donc la seule règle permettant de conduire à la concordance de deux actions de résolution : il faut que chaque objet de la facette **[Associations]** de la description de l'apprenant concorde avec un objet de la facette **[Associations]** de la description de l'expert. Comme le but premier est d'établir la concordance des objets AObj7 et EObj3, ils ne sont pas considérés. Il reste AObj6 et EObj2, dont la concordance a été prouvée précédemment. De cette façon, le moteur vient d'établir que les facettes **[Associations]** des deux actions de résolution, ARes2 et ERes1, contiennent des objets qui concordent deux à deux. De plus, ces deux actions sont indépendantes, donc le moteur n'a pas à établir la concordance des dépendances. De ce fait, il vient d'établir la concordance entre les actions de résolution ARes2 et ERes1. Comme cette concordance était suffisante à l'établissement de la concordance entre AObj7 et EObj3, le moteur déduit que ces deux derniers objets concordent. Toutes les paires contenant un des objets AObj7 et EObj3 sont retirées de la liste des candidats.

Le moteur enchaîne en essayant d'établir la concordance des candidats suivants : AObj1 et EObj4. Les facettes **Provenance** de ces deux objets sont vides, ce qui conduit le moteur à évaluer la troisième règle de concordance d'objets. AObj1 et EObj4 concordent si la concordance de toutes leurs parties constituantes a été établie. D'une part, AObj1 a pour parties constituantes AObj2, AObj3 et AObj4 et, d'autre part, EObj4 a pour parties constituantes EObj5, EObj6 et EObj7. Aucune concordance impliquant ces objets n'a été établie jusqu'alors, l'algorithme ne peut donc conclure à la concordance de AObj1 et EObj4.

Le moteur poursuit avec la paire de candidats suivante : AObj4 et EObj5. Ces deux objets proviennent respectivement des actions de résolution ARes1 et ERes2. Le moteur part donc en

profondeur d'abord pour établir la concordance entre ces deux actions. Les facettes **[Associations]** de ces actions contiennent respectivement AObj4, AObj2 et AObj3 pour ARes1 et EObj5, EObj7 et EObj6 pour ERes2. Comme le but est de prouver la concordance entre AObj4 et EObj5, ces objets sont ignorés. Le moteur passe à la concordance entre AObj2 et EObj7. Ces objets concordent si leur provenance concordent. Il s'agit respectivement de EUni1 et EUni2. Ces actions d'unification concordent si les facettes **Connu** concordent d'une part et si les facettes **Affecté** concordent d'autre part. Les facettes **Connu** sont AObj7 pour AUni1 et EObj3 pour EUni1. Ces deux objets concordent ; cela a été établi précédemment. Les facettes **Affecté** ne sont pas considérées, car elles concernent AObj2 et EObj7, justement la concordance que l'algorithme est en train d'établir. Les actions d'unification sont de plus indépendantes donc leur concordance vient d'être établie. De ce fait, AObj2 et EObj7 concordent. Reste la paire AObj3 et EObj6. Ces objets concordent, car leur provenance est « énoncé » et leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont égales deux à deux (respectivement 100 et s). Les facettes **[Associations]** des actions ARes1 et ERes2 contiennent donc des objets qui concordent deux à deux. Ces deux actions de résolution sont indépendantes ; leur concordance vient, par conséquent, d'être établie. Il en découle l'établissement de la concordance entre les objets AObj4 et EObj5.

Nous avons vu qu'à chaque fois qu'une nouvelle concordance est établie, les objets concernés sont retirés de la liste des candidats. À ce stade, le moteur a passé en revue toute les paires présentes dans la liste. Comme de nouvelles concordances ont été établies durant ce cycle, le moteur entreprend un nouveau cycle en explorant de nouveau la liste des candidats. Il réessaye d'établir la concordance entre AObj5 et EObj1. Ces deux objets ont des provenances vides et, respectivement, comme parties constituantes AObj6 et AObj7 pour AObj5 et EObj2 et EObj3 pour EObj1. Comme les concordances entre AObj6 et EObj2 d'une part et entre AObj7 et EObj3 d'autre part ont été établies, le moteur en déduit la concordance entre AObj5 et EObj1. Le moteur passe à la dernière paire de candidats : AObj1 et EObj4. Les provenances de ces objets sont vides et ils ont respectivement comme parties constituantes AObj2, AObj3 et AObj4 pour AObj1 et EObj5, EObj6 et EObj7 pour EObj1. Comme les concordances entre AObj2 et AObj6, entre AObj3 et EObj6 et entre AObj4 et EObj5 ont été établies précédemment, le moteur en déduit la concordance entre AObj1 et EObj4.

La liste des paires de candidats a été épuisée ; chaque description de l'apprenant concorde avec une description de l'expert. Nous pouvons donc en déduire que la représentation mentale de l'apprenant concorde avec celle de l'expert.

En résumé, l'ordre dans lequel les concordances ont été établies par le moteur pour le problème du coureur est rappelé au Tableau 5-6.

TABLEAU 5-6 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES DANS LE PROBLÈME DU COUREUR

App.	Exp.	Item
AObj6	EObj2	It2
ARes2	ERes1	It9
AObj7	EObj3	It3
AUni1	EUni1	/
AObj2	EObj7	It7
AObj3	EObj6	It6
ARes1	ERes2	It8
AObj4	EObj5	It5
AObj5	EObj1	It1
AObj1	EObj4	It4

5.5 Conclusion

Le processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant que nous proposons transcrit des éléments de la théorie cognitiviste en matière de modèles mentaux : il permet de détecter des erreurs de cohérence au sein d'un modèle mental, il permet d'exécuter un modèle mental et enfin il permet de comparer deux modèles mentaux afin de déduire des similitudes et des différences entre eux. Tout ceci est rendu possible grâce à des techniques d'intelligence artificielle qui analysent le modèle mental représenté à l'aide du formalisme décrit au chapitre 4. Au nombre de ces techniques, citons les règles de production, différents moteurs d'inférences et

la représentation sous forme d'arbre binaire pour les équations, comme le montre le chapitre 6 consacré au prototype.

CHAPITRE 6

LE PROTOTYPE

6.1 Introduction

Comme nous venons de le voir lors des chapitres 4 et 5, nos démarches d'élaboration du formalisme et du processus de validation sont fortement liées. Comme tout prototype, celui que nous avons développé correspond à une version expérimentale destinée à mettre à l'épreuve nos hypothèses de travail. Ce chapitre présente les caractéristiques du prototype que nous avons développé à ces fins en abordant l'implantation informatique sous différents aspects sans entrer dans les détails de la programmation proprement dite. Il décrit les choix que nous avons faits afin de rendre compte de la faisabilité de notre approche face à des problèmes tels que ceux proposés dans les sciences de base de l'ingénierie.

Nous nous sommes contentés de valider le modèle que nous proposons en misant sur certaines prémisses. Ainsi nous présupposons qu'il est possible d'obtenir, à partir d'un apprenant et d'un expert, une version formalisée de la représentation mentale que se fait l'un ou l'autre de la solution d'un problème qui lui est posé. Nous prétendons également, qu'avec l'aide d'un expert en didactique du domaine dont relève le problème à résoudre, il sera possible de produire un diagnostic et une intervention appropriée à partir des résultats fournis par le processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant.

6.2 Les caractéristiques de l'implantation informatique

6.2.1 Les choix technologiques

Il nous a paru judicieux de tester notre approche sur les machines les plus communément utilisées et les plus facilement disponibles en milieu scolaire. Ces considérations nous ont donc amenés à utiliser une plate-forme basée sur la technologie des ordinateurs personnels équipés de processeurs type 486 ou Pentium. En ce qui concerne le choix du langage, nous nous sommes

turnés vers le Prolog pour plusieurs raisons. La programmation déclarative et les mécanismes intrinsèques de ce langage facilitent la programmation et le traitement lorsqu'il s'agit de représentation de connaissances. Les bases de données, l'usage de listes, la recherche non déterministe de solutions, l'unification et le retour arrière sont autant d'avantages qu'il aurait fallu créer de toute pièce si l'on avait opté pour un langage procédural comme le C++. Une première version du prototype a été développée avec une version de Prolog fonctionnant à partir du système d'exploitation MS-DOS®. Mais les problèmes inhérents à ce système d'exploitation lorsque l'application devient exigeante en ressources (limitation de mémoire essentiellement, nécessitant des accès répétés aux disques qui ralentissent l'application) nous a fait remettre en question ces choix. Afin de continuer à tirer profit des avantages offerts par le Prolog, nous sommes passés à une version de Prolog fonctionnant dans l'environnement Windows'95®. Ce choix était également motivé par le fait que les modifications imposées par ce changement de version restaient raisonnables en regard de l'option qui nous était offerte de recréer un prototype en C++. La nouvelle version de Prolog utilisée nous a permis d'intégrer des notions offertes par le langage de spécification de connaissances Flex. Cette surcouche du langage Prolog nous a permis de revoir complètement le formalisme en abandonnant le recours à des bases de données pour représenter les descriptions au profit de l'implantation sous la forme de cadres conceptuels (*frame*) intégrés à Flex. Enfin, ce changement de version nous a permis de mettre en place une interface de dialogue avec le prototype beaucoup plus conviviale, tirant profit de la souplesse et de l'ergonomie du système Windows®.

Le prototype a recours aux listes pour représenter les associations liant les variables et les objets dans les descriptions des actions de résolution. Les listes permettent également de représenter les facettes [**Entrées**] et **Sortie** dans les descriptions des actions de consultation. Les mécanismes de retour arrière jouent un grand rôle dans l'évaluation de la cohérence et dans l'évaluation de la concordance afin de parcourir de manière exhaustive les descriptions et leurs facettes. C'est aussi ce procédé qui entre en jeu dans le système de résolution automatique des équations à une inconnue lors de l'exécution de la représentation mentale faite par l'apprenant.

6.2.2 Les fonctionnalités

Les possibilités qu'offre le prototype s'organisent autour d'une fenêtre (Figure 6-1) dans laquelle on retrouve l'énoncé du problème à résoudre, la liste des items disponibles mise au point par l'expert et plusieurs boutons permettant différentes actions relatives au formalisme et au processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant. Il est possible de visualiser sous forme de fiches ou de tableaux les descriptions faites par l'apprenant et celles faites par l'expert, il est également possible d'exporter ces descriptions sous forme d'un fichier utilisable par Excel®.

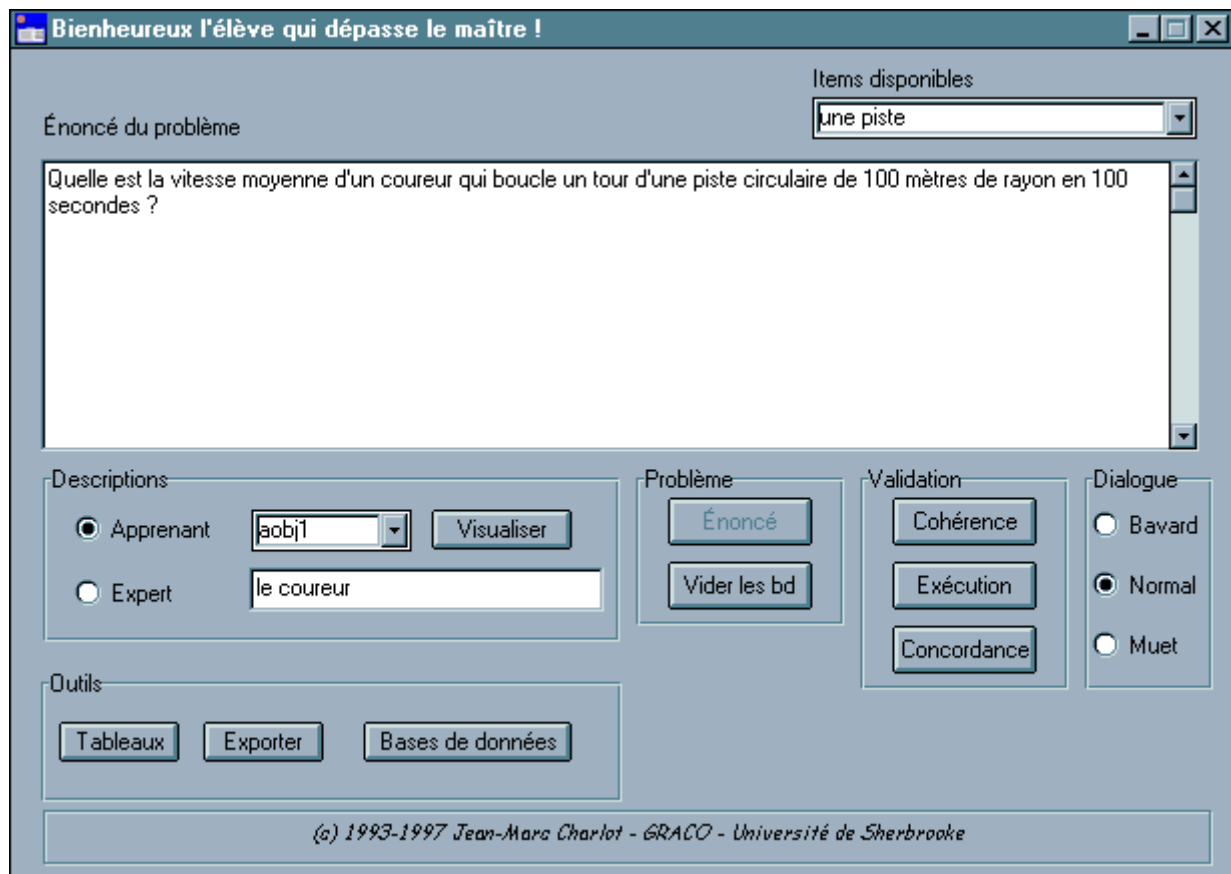


Figure 6-1 La fenêtre de dialogue avec le prototype

Les trois phases de la validation de la description faite par l'apprenant peuvent être lancées depuis cette fenêtre : l'évaluation de sa cohérence, son exécution et l'évaluation de la concordance avec celle donnée par l'expert. Divers outils internes sont disponibles, comme la consultation de l'état

des bases de données contenant des résultats intermédiaires et temporaires, ou encore le choix du mode de dialogue du prototype.

6.2.3 L'implantation informatique

Les descriptions sont implantées informatiquement sous forme de cadres conceptuels constitués d'attributs et héritant les uns des autres, selon le standard *ksl* (*Knowledge Specification Language*) de Flex [LPA, 1996b]. Les descriptions sont organisées sous forme de classes hiérarchisées, exactement comme le présente la Figure 4-1, p. 65.

Pour faciliter la mise au point du prototype, les deux premières parties du processus présenté au chapitre 5 (évaluation de la cohérence et exécution de la représentation mentale) peuvent être effectuées aussi bien sur la description donnée par l'apprenant que sur celle donnée par l'expert. C'est la généricité des mécanismes mis en œuvre qui permet, selon le choix, d'utiliser le niveau apprenant ou le niveau expert. Bien sûr, il semble inutile de vouloir vérifier la cohérence de la description donnée par l'expert, mais durant la phase de développement du prototype et de validation du formalisme, il est important pour nous de vérifier cette cohérence, car le rôle d'expert nous revenait. Le fait que la description donnée par l'expert soit exécutable par le logiciel évite à l'expert d'effectuer les calculs numériques et permet d'avoir une description adaptée au formalisme.

- Étape 1 : évaluation de la cohérence

L'évaluation de la cohérence se fait par une vérification des tests que nous avons exposés au chapitre 5 sur chacune des descriptions correspondantes. Si une erreur de cohérence est détectée, un message signale le type d'erreur de cohérence dont il s'agit en localisant la description ainsi que la ou les facettes prises en défaut. L'apparition d'un message arrête immédiatement l'évaluation de la cohérence en invitant l'utilisateur à revoir la description faite par l'apprenant. Les mécanismes de retour arrière assurent une prise en compte exhaustive de toutes les descriptions nécessaires pour chacun des tests.

- Étape 2 : l'exécution de la description

Le prototype permet d'exécuter la description faite par l'apprenant ainsi que celle donnée par l'expert. Le processus cyclique décrit dans le chapitre 5 permet en trois étapes de déduire les facettes **État**, **Valeur** et **Unité** des descriptions pour lesquelles ces facettes étaient indéterminées ou encore inconnues. Pour cela, a été développé un moteur d'inférences d'ordre 0+ explorant les descriptions par chaînage avant en largeur d'abord, de façon monotone et par tentatives.

La première sous-étape est de déterminer les facettes **État** des conditions et des propriétés pour lesquelles c'est possible, c'est-à-dire pour des conditions dont les facettes **1^{er} Opérande** et **2^e Opérande** sont connues (respectivement **1^{er} Objet** et **2^e Objet** pour une propriété). Ceci s'effectue en analysant le contenu des facettes des descriptions des dépendances. Les tests logiques correspondants sont effectués et les facettes **État** sont mises à jour conformément aux résultats produits par ces tests. Les dépendances n'ayant pas pu être déterminées à cause d'au moins une facette indéterminée seront réévaluées au cycle suivant, car de nouveaux objets ou de nouvelles dépendances déduits lors du présent cycle lèveront peut-être l'indétermination.

La seconde sous-étape consiste à lancer les actions déclenchables. Le traitement dépend du type d'action à lancer.

Pour les actions de résolution, les équations sont résolues lorsqu'elles ne présentent plus qu'une seule inconnue. Cette résolution est basée sur la représentation d'une équation en arbre binaire à parcourir en profondeur d'abord, comme le montre la Figure 6-2 pour l'équation des gaz parfaits : $PV=nRT$.

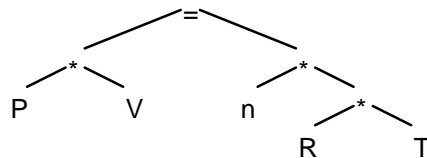


Figure 6-2 La représentation sous forme d'arbre binaire de l'équation $PV = nRT$

Les noms de variables dans l'équation sont remplacés par les identificateurs des objets correspondants, en accord avec la liste des associations de la facette **[Associations]** de l'action de

résolution. Ensuite, l'objet indéterminé (la seule inconnue de cette équation) est isolé et l'arbre binaire remanié afin que l'objet à déterminer soit seul dans le membre de gauche de l'arbre binaire, sous le signe $=$. La Figure 6-3 montre l'arbre obtenu après avoir isolé T dans l'équation $PV = nRT$

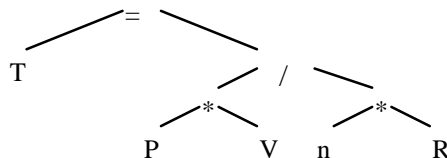


Figure 6-3 L'arbre obtenu après isolation de T dans l'équation $PV = nRT$

Le parcours du sous-arbre droit du signe égal peut être évalué, car il ne contient plus que des objets connus. Les calculs sont effectués dans le système international en résolvant l'équation aux dimensions et en ayant recours si nécessaire à une table de conversion des unités. Une fois que la valeur de l'objet cherché est déterminée, ses facettes **Valeur** et **Unité** sont remplies conformément aux résultats fournis par l'algorithme de résolution. Une fois que l'équation est résolue de manière numérique, l'algorithme réutilise l'arbre correspondant à l'équation et y substitue chaque variable par son unité dans le but de résoudre l'équation aux dimensions.

Pour le cas des actions de consultation, il s'agit de chercher une correspondance dans une table préalablement rentrée et stockée sous forme informatique. Un exemple d'actions de consultation concerne les tables de thermodynamique telles qu'on les retrouve à la fin du manuel de référence du cours [VAN WYLEN ET COLL, 1992], le procédé de consultation a été repris depuis le logiciel Thermex [MARCOS ET COLL., 1990] et fait appel à des tables entrées sous formes de bases de données Prolog. Une interpolation linéaire simple ou double est réalisée pour obtenir les valeurs intermédiaires non présentes dans les tables. Un traitement semblable peut aisément être mis au point dans d'autres cas : par exemple dans des problèmes d'électronique qui nécessitent d'avoir recours à des abaques de Smith.

Il peut arriver que la consultation d'une table ou d'un abaque avec les mêmes entrées soit nécessaire pour déterminer plusieurs variables d'un problème : par exemple, dans un problème de

thermodynamique, il peut arriver que l'on cherche à connaître le volume massique et l'entropie pour une température et une pression données. Le prototype permet de déterminer plusieurs objets en une seule action de consultation : la facette **Sortie** est implantée sous forme de liste, comme l'est la facette **Entrées**. Toutefois, nous ne favorisons pas cette pratique, qui consiste à déterminer plus d'un seul objet par action de consultation, car cela ne semble pas correspondre à la réalité en terme d'actions de résolution. Mieux vaut séparer chaque objet et définir sa propre provenance.

Pour exécuter les actions d'unification, comme nous l'avons signalé au chapitre 5, il suffit d'appliquer à l'objet contenu dans la facette **Connu**, le facteur correspondant à la facette **Relation** et de mettre à jour la facette **Affecté** avec le résultat obtenu.

- Étape 3 : Évaluation de la concordance

L'évaluation de la concordance a été implantée informatiquement comme elle a été décrite au chapitre 5.

Les paires de candidats sont classées par items et, si le nombre d'instanciations d'un item par l'apprenant diffère du nombre d'instanciations du même item par l'expert, des hypothèses et éventuellement des supputations sont générées et stockées dans une base de données afin de permettre l'établissement des concordances.

Les règles de concordance ont été traduites en Prolog et un moteur d'inférences procédant en chaînage arrière et en profondeur d'abord sur la valeur des facettes tente d'établir la concordance de chaque paire de candidats. Chaque concordance ainsi établie est maintenue dans une base de données, l'information concernant les hypothèses qui ont éventuellement servi à établir cette concordance et les supputations restantes y sont enregistrées également. Ce sont ces bases de données, concordances, hypothèses et supputations qui devront être utilisées dans le module de diagnostic pour indiquer à l'apprenant la raison pour laquelle sa représentation mentale est erronée.

6.3 Les limites

Le prototype que nous avons développé fonctionne et nous avons poussé son degré d'élaboration à un niveau répondant à nos besoins. Comme nous l'avons mentionné, il s'agit d'une version expérimentale, ses fonctionnalités devraient être améliorées en vue d'une intégration dans un logiciel plus robuste. C'est pourquoi nous soulignons quelques limites qu'il serait bon de repousser.

Le solveur d'équations reconnaît un certain nombre d'opérateurs. En voici la liste :

- les quatre opérateurs binaires de base : +, -, *et / ;
- les opérateurs trigonométriques simples et leur opérateur inverse : cos, sin, tan, acos, asin et atan ;
- l'opérateur d'exponentiation et la racine carrée : ^ et sqrt.

Certains opérateurs pourraient aisément être ajoutés, comme les fonctions logarithme et exponentielle ainsi que les fonctions trigonométriques hyperboliques par exemple.

Par contre, le solveur supporte difficilement des opérateurs correspondant à des fonctions non injectives⁸, comme la valeur absolue par exemple. Ce type d'opérateurs conduit à des opérateurs réciproques admettant plusieurs solutions. Ceci sera toléré tant que la variable à isoler par le solveur n'est pas un argument d'un tel opérateur car, dans ce cas, le solveur n'a pas à considérer l'opérateur réciproque et l'équation n'admet qu'une solution.

La résolution des équations aux dimensions fonctionne et est suffisante pour nos besoins dans ce prototype. Cependant, elle pourrait être raffinée. Par exemple, les unités calculées ne sont pas simplifiées ni transposées dans l'unité correspondante dans le système international. Ceci pourrait être fait en introduisant une table de conversion des unités.

⁸ Une fonction f de $D \rightarrow A$ est dite injective, si $\forall x_1$ et $x_2 \in D$ vérifiant $f(x_1) = f(x_2)$, alors $x_1 = x_2$.

La phase du processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant correspondant à l'évaluation de la concordance avec la représentation de l'expert ne tient aucunement compte des résultats produits lors de l'étape d'exécution. D'ailleurs, la concordance peut aussi bien être évaluée sans avoir lancé l'exécution auparavant. Ceci est dû au fait que nous voulons montrer qu'il est possible d'analyser et de comparer des représentations mentales en s'affranchissant de tout calcul numérique, en s'intéressant juste à la démarche de résolution.

Toutefois, la prise en compte des résultats obtenus lors de l'exécution des représentations mentales pourrait certainement servir à affiner le diagnostic produit à l'aide des hypothèses et des concordances.

6.4 Conclusion

Le prototype que nous avons mis au point permet de traduire sous forme informatique la représentation mentale d'un apprenant et celle d'un expert en situation de résolution de problèmes mathématiquement formalisables. Pour cela, nous avons eu recours à des techniques d'intelligence artificielle comme les cadres conceptuels et les réseaux sémantiques pour décrire les stratégies de résolution, et les moteurs d'inférences et les règles de production pour l'analyse de ces descriptions. Ce prototype nous a permis de tester et de valider nos hypothèses de travail quant au formalisme de modélisation des représentations mentales et au processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant. Le chapitre suivant présente les exemples les plus significatifs qui ont permis cette validation.

CHAPITRE 7

LES EXEMPLES ET LES RÉSULTATS

7.1 Introduction

Le problème du coureur, choisi pour illustrer le chapitre 4, ne couvre pas toutes les descriptions pouvant être prises en compte par le formalisme. De plus, dans le cadre de cette illustration, nous n'avons abordé que la représentation mentale de l'expert, sans nous intéresser à celle de l'apprenant. C'est pourquoi ce chapitre traite d'autres problèmes simples, côté expert et côté apprenant, afin d'illustrer complètement le formalisme de représentation présenté au chapitre 4 d'une part et pour présenter des résultats pouvant être produits par le processus de validation présenté au chapitre 5 d'autre part. Tout ceci a été rendu possible grâce au prototype que nous avons développé et qui a été présenté au chapitre 6.

Les exemples constituant ce chapitre abordent des domaines différents et ont été élaborés pour valider le formalisme et le processus. Ils ne proviennent d'aucune étude effectuée auprès de réels apprenants et experts : nous avons joué ces deux rôles afin de transcrire des représentations mentales hypothétiques. Nous avons choisi pour les deux premiers exemples (l'équation du second degré et le triangle) des représentations mentales d'apprenants correctes, concordant avec celles des experts mais non identiques à ces dernières. Les deux autres exemples (le coureur et la thermodynamique) traduisent des représentations mentales d'apprenants erronées.

En ce qui concerne l'évaluation de la cohérence, nous ne l'aborderons pas dans ces exemples. Nous supposons que cette étape a été franchie précédemment et que, d'une manière générale, les représentations que nous traitons sont cohérentes. Cette étape du processus de validation conduit simplement à l'affichage de messages permettant à l'apprenant de modifier sa représentation mentale dans le but de la rendre cohérente le cas échéant. Pour tester l'évaluation de la cohérence à l'aide de notre prototype, il suffit de prendre une de ces représentations et de

modifier ou de supprimer quelques descriptions ou quelques facettes afin de la rendre incohérente. Ces erreurs sont aussitôt détectées et des messages appropriés sont affichés.

7.2 Le problème de l'équation du second degré

7.2.1 Introduction

Ce problème nous a paru intéressant, car sa résolution nécessite un choix de stratégie qui dépend d'un résultat intermédiaire : en effet, la détermination du type et des valeurs des racines d'une équation du second degré dépend de la valeur du discriminant. Cet exemple permet donc de mettre en relief la possibilité offerte par le formalisme de détailler une stratégie de résolution sous forme algorithmique.

7.2.2 L'énoncé

Résoudre l'équation suivante: $x^2 + x + 1 = 0$

7.2.3 La formalisation de la représentation mentale de l'expert

La stratégie préconisée par l'expert pour résoudre ce problème est la démarche classique de résolution d'une équation du second degré :

1. Calculer le discriminant par la relation $\Delta = b^2 - 4 * a * c$ (l'équation étant sous la forme canonique $ax^2 + bx + c = 0$)
2. Si le discriminant est positif, les racines sont réelles pures et valent :

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}, \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}$$

3. Si le discriminant est nul, il y a une racine double qui vaut : $x = -\frac{b}{2a}$
4. Si le discriminant est négatif, les racines sont complexes conjuguées et valent :

$$x_1 = \frac{-b + i\sqrt{-\Delta}}{2a}, \quad x_2 = \frac{-b - i\sqrt{-\Delta}}{2a}$$

Le Tableau 7-1 présente la liste des items utilisés par l'expert pour résoudre ce problème, nous n'avons pas ajouté de bruit de fond par souci de clarté.

TABLEAU 7-1 LES ITEMS DISPONIBLES POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Item
It1	une équation du second degré
It2	coefficient x^2
It3	coefficient x
It4	coefficient constant
It5	un discriminant
It6	une racine réelle
It7	une racine complexe
It8	une racine double
It9	une partie réelle
It10	une partie imaginaire
It11	$\Delta = b^2 - 4*a*c$
It12	$x = (-b + \sqrt{\Delta}) / (2*a)$
It13	$x = (-b - \sqrt{\Delta}) / (2*a)$
It14	$x = -b / (2*a)$
It15	$y = \sqrt{-\Delta} / (2*a)$

Le Tableau 7-2 présente les objets utilisés par l'expert pour résoudre ce problème. Notons que seules les facettes **Valeur** des objets dont la provenance est l'énoncé sont données. Ce problème ne mentionne aucune unité pour les données de l'énoncé. Les facettes **Unité** correspondantes sont donc laissées vides volontairement. Les autres facettes **Valeur** et **Unité** sont déterminées par le moteur en charge de l'exécution des représentations mentales si nécessaire.

TABLEAU 7-2 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE
L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj1	$ax^2 + bx + c = 0$	It1				
EObj2	a	It2	EObj1	Énoncé	1	
EObj3	b	It3	EObj1	Énoncé	1	
EObj4	c	It4	EObj1	Énoncé	1	
EObj5	Δ	It5	EObj1	ERes1		
EObj6	1 ^{re} racine réelle	It6	EObj1	ERes2		
EObj7	2 ^e racine réelle	It6	EObj1	ERes3		
EObj8	racine double	It8	EObj1	ERes4		
EObj9	1 ^{re} racine complexe	It7	EObj1			
EObj10	2 ^e racine complexe	It7	EObj1			
EObj11	partie réelle 1	It9	EObj9	ERes6		
EObj12	partie imaginaire 1	It10	EObj9	ERes5		
EObj13	partie réelle 2	It9	EObj10	EUni1		
EObj14	partie imaginaire 2	It10	EObj10	EUni2		

Le Tableau 7-3 présente les actions de résolution utilisées par l'expert pour ce problème. Notons que le calcul du discriminant (ERes1) est une action de résolution indépendante, c'est-à-dire que sa facette **Dépendance** est vide, alors que les 5 autres, correspondant au calcul des racines sont dépendantes de conditions. Ceci traduit le choix de la stratégie de calcul des racines en fonction de la valeur du discriminant, et nous y reviendrons au sujet des dépendances.

TABLEAU 7-3 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ERes1	$\Delta = b^2 - 4*a*c$	It11	[$\Delta = EObj5$, $a = EObj2$, $b = EObj3$, $c = EObj4$]	
ERes2	$x = (-b + \sqrt{\Delta}) / (2*a)$	It12	[$x = EObj6$, $\Delta = EObj5$, $a = EObj2$, $b = EObj3$]	ECdt1
ERes3	$x = (-b - \sqrt{\Delta}) / (2*a)$	It13	[$x = EObj7$, $\Delta = EObj5$, $a = EObj2$, $b = EObj3$]	ECdt1
ERes4	$x = -b / (2*a)$	It14	[$x = EObj8$, $a = EObj2$, $b = EObj3$]	ECdt2
ERes5	$y = \sqrt{-\Delta} / (2*a)$	It15	[$y = EObj12$, $\Delta = EObj5$, $a = EObj2$]	ECdt3
ERes6	$x = -b / (2*a)$	It14	[$x = EObj11$, $a = EObj2$, $b = EObj3$]	ECdt3

Le Tableau 7-4 présente les actions d'unification utilisées par l'expert pour résoudre ce problème. Dans le cas de racines complexes, les parties réelles sont égales, donc on calcule la première (EObj11) à l'aide d'une action de résolution (comme nous l'avons vu dans le Tableau 7-3, avec ERes6) et la deuxième racine (EObj13) est déterminée à l'aide de l'action d'unification EUni1 qui relie EObj13 et EObj11 par une relation « égalité ». De même, les parties imaginaires sont conjuguées ; on calcule donc la première (EObj12) à l'aide de ERes5 et on détermine la seconde (EObj14) par une action d'unification EUni2 qui relie EObj14 et EObj12 par la relation « opposé ».

TABLEAU 7-4 LES ACTIONS D'UNIFICATION UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id	Connu	Affecté	Relation	Dépendance
EUni1	EObj11	EObj13	égalité	
EUni2	EObj12	EObj14	opposé	

Le Tableau 7-5 présente les conditions utilisées par l'expert pour résoudre ce problème. Ces conditions permettent d'orienter la résolution vers la stratégie appropriée en fonction de la valeur du discriminant. L'état des conditions est initialement indéterminé car le premier opérande (EObj5) n'est pas connu.

TABLEAU 7-5 LES CONDITIONS UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ECdt1	EObj5	>	0	Indéterminé
ECdt2	EObj5	=	0	Indéterminé
ECdt3	EObj5	<	0	Indéterminé

Aucune propriété ni action de consultation n'ont été nécessaires à l'expert pour résoudre ce problème ; les tables correspondantes sont donc vides et non représentées.

7.2.4 L'exécution de la représentation mentale de l'expert

Le moteur cherche à déterminer les dépendances évaluable. Les trois conditions (ECdt1, ECdt2 et ECdt3) portent sur l'objet EObj5. Sa valeur étant inconnue, aucune de ces trois conditions n'est évaluable. Leur état reste donc indéterminé.

Le moteur tente ensuite de lancer les actions déclenchables. Il les essaye dans l'ordre dans lequel elles ont été décrites, c'est-à-dire dans l'ordre dans lequel elles apparaissent dans le Tableau 7-3.

ERes1 est une action indépendante, car sa facette **Dépendance** est vide. Elle est déclenchable si sa facette **[Associations]** ne comporte qu'un objet inconnu. La facette **[Associations]** de ERes1 contient les objets EObj5, EObj2, EObj3 et EObj4. De ces quatre objets, seul EObj5 est inconnu, l'action ERes1 peut donc être lancée afin de déterminer les facettes **Valeur** et **Unité** de EObj5, comme le montre le Tableau 7-6. La valeur est -3 et l'unité est 1. Comme dans l'énoncé les coefficients a, b et c sont donnés sans dimension, la résolution de l'équation aux dimensions

concernant EObj5 donne 1, ce qui correspond à une valeur calculée sans dimension. Il en sera de même pour tous les autres objets déterminés dans ce problème.

TABLEAU 7-6 LA DÉTERMINATION DE L'OBJET EOBJ5

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj5	Δ	It5	EObj1	ERes1	-3	1

Les actions ERes2, ERes3, ERes4, ERes5 et ERes6 sont des actions dont le déclenchement dépend des conditions ECdt1 (pour ERes2 et ERes3), ECdt2 (pour ERes4) et ECdt3 (pour ERes5 et ERes6). Or aucune de ces trois conditions n'a put être déterminée lors de l'étape de détermination des dépendances évaluables, faute de connaître EObj5. Par conséquent, ces actions de résolution ne peuvent pas être déclenchées.

Le moteur essaye à présent de lancer les actions d'unification. EUni1 et EUni2 sont indépendantes, mais les objets servant de facette **Connu** (EObj11 pour EUni1 et EObj12 pour EUni2) sont inconnus. Ces deux actions ne peuvent donc pas être déclenchées.

Le cycle se termine donc ainsi et comme un objet a été déterminé lors de ce cycle (EObj5), le moteur repart pour un nouveau cycle. Il réessaye de déterminer les dépendances évaluables. Les trois conditions (ECdt1, ECdt2 et ECdt3) portent sur EObj5 qui maintenant est connu. Les expressions logiques sont évaluées et les descriptions sont modifiées en mettant à jour les facettes **État** des trois conditions, comme le montre le Tableau 7-7.

TABLEAU 7-7 LA DÉTERMINATION DES DÉPENDANCES LORS DE LA RÉOLUTION PAR L'EXPERT DU PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ECdt1	EObj5	>	0	<i>Faux</i>
ECdt2	EObj5	=	0	<i>Faux</i>
ECdt3	EObj5	<	0	<i>Vrai</i>

Le moteur tente de lancer les actions déclenchables qui n'ont pas encore été lancées. ERes2 et ERes3 dépendent de la condition ECdt1 qui est déterminée mais dont l'état est Faux. Par conséquent, ces deux actions de résolution ne sont pas déclenchables. Il en est de même pour ERes4 qui dépend de ECdt2, dont l'état est Faux également. Par contre, ERes5 et ERes6 dépendent toutes les deux de la condition ECdt3 dont l'état est Vrai. La facette **[Associations]** de ERes5 ne contient que EObj12 comme inconnue, elle peut donc être lancée et EObj12, déterminé. De même, ERes6 ne contient que EObj11 comme inconnue dans sa facette **[Associations]**, elle est également lancée et EObj11 déterminé, comme le montre le Tableau 7-8.

TABLEAU 7-8 LA DÉTERMINATION DES OBJETS EOBJ12 ET EOBJ11

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj12	partie imaginaire 1	It10	EObj9	ERes5	0.86603	1
EObj11	partie réelle 1	It9	EObj9	ERes6	-0.5	1

Le moteur continue en essayant à nouveau de lancer les actions d'unification EUni1 et EUni2. Elles sont indépendantes et portent maintenant sur des facettes **Connu** effectivement déterminées (EObj11 pour EUni1 et EObj12 pour EUni2). Le moteur les lance donc successivement en appliquant la relation « égalité » à EObj11 afin de déterminer EObj13 pour EUni1 et en appliquant la relation « opposé » à EObj12 afin de déterminer EObj14 pour EUni2. Les objets ainsi déterminés sont présentés au Tableau 7-9.

TABLEAU 7-9 LA DÉTERMINATION DES OBJETS EOBJ13 ET EOBJ14

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj13	partie réelle 2	It9	EObj10	EUni1	-0.5	1
EObj14	partie imaginaire 2	It10	EObj10	EUni2	-0.86603	1

Ce deuxième cycle se termine, car le moteur a essayé de déclencher toutes les actions. Comme de nouveaux objets ont été déterminés, le moteur repart pour un troisième cycle.

Il n'y a plus de dépendance à évaluer ; les actions ERes2, ERes3 et ERes4 ne sont toujours pas déclenchables, car les conditions dont elles dépendent sont fausses et toutes les autres actions ont déjà été déclenchées. Ce troisième cycle se termine, sans que le moteur n'ait déterminé de nouveaux objets. De ce fait, le moteur s'arrête.

En résumé, retenons que l'ordonnancement des tâches lors de l'exécution de la description de l'expert est le suivant :

ERes1, ECdt1, ECdt2, ECdt3, ERes5, ERes6, EUni1 et EUni2.

Cette liste permet de montrer que, même si la notion d'ordre des tâches n'est pas explicitement donnée dans le formalisme, elle y est implicitement contenue du fait de l'imbrication des descriptions qui se font référence les unes aux autres. C'est cet enchevêtrement qui permet au processus lors de l'exécution de la description (étape 3), de réaliser les tâches dans le même ordre que celui voulu par l'expert (ou par l'apprenant le cas échéant).

7.2.5 La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant

Nous supposons que l'apprenant a su identifier dans la liste des items ceux qui étaient nécessaires à la résolution du problème et qu'il en est arrivé à une description semblable à celle de l'expert, mais non identique, comme le montre les tableaux suivants (Tableau 7-10, Tableau 7-11, Tableau 7-12 et Tableau 7-13).

TABLEAU 7-10 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj1	$ax^2 + bx + c = 0$	It1				
AObj2	c	It4	AObj1	Énoncé	1	
AObj3	b	It3	AObj1	Énoncé	1	
AObj4	a	It2	AObj1	Énoncé	1	
AObj5	Delta	It5	AObj1	ARes1		
AObj6	racine double	It8	AObj1	ARes4		
AObj7	1 ^{re} racine réelle	It6	AObj1	ARes2		
AObj8	2 ^e racine réelle	It6	AObj1	ARes3		
AObj9	1 ^{re} racine complexe	It7	AObj1			
AObj10	2 ^e racine complexe	It7	AObj1			
AObj11	réelle 1	It9	AObj10	ARes6		
AObj12	réelle 2	It9	AObj9	AUni2		
AObj13	imaginaire 1	It10	AObj10	ARes5		
AObj14	imaginaire 2	It10	AObj9	AUni1		

TABLEAU 7-11 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ARes1	$\Delta = b^2 - 4*a*c$	It11	$[\Delta = \text{AObj5}, a = \text{AObj4}, b = \text{AObj3}, c = \text{AObj2}]$	
ARes2	$x = (-b - \sqrt{\Delta}) / (2*a)$	It13	$[x = \text{AObj7}, \Delta = \text{AObj5}, a = \text{AObj4}, b = \text{AObj3}]$	ACdt3
ARes3	$x = (-b + \sqrt{\Delta}) / (2*a)$	It12	$[x = \text{AObj8}, \Delta = \text{AObj5}, a = \text{AObj4}, b = \text{AObj3}]$	ACdt3
ARes4	$x = -b / (2*a)$	It14	$[x = \text{AObj6}, a = \text{AObj4}, b = \text{AObj3}]$	ACdt2
ARes5	$y = \sqrt{-\Delta} / (2*a)$	It15	$[y = \text{AObj13}, \Delta = \text{AObj5}, a = \text{AObj4}]$	ACdt1
ARes6	$x = -b / (2*a)$	It14	$[x = \text{AObj11}, a = \text{AObj4}, b = \text{AObj3}]$	ACdt1

TABLEAU 7-12 LES ACTIONS D'UNIFICATION UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dépendance
AUni1	AObj13	AObj14	opposé	
AUni2	AObj11	AObj12	égalité	

TABLEAU 7-13 LES CONDITIONS UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ACdt1	AObj5	<	0	Indéterminé
ACdt2	AObj5	=	0	Indéterminé
ACdt3	AObj5	>	0	Indéterminé

7.2.6 L'exécution de la description faite par l'apprenant

Nous n'allons pas reprendre toute la démarche correspondant à l'exécution de la description donnée par l'apprenant, elle est similaire à celle de l'expert présentée au paragraphe 7.2.4, page 98. Nous ne présentons que les descriptions qui ont été modifiées au cours de l'exécution (Tableau 7-14 et Tableau 7-15).

TABLEAU 7-14 LES CONDITIONS MODIFIÉES LORS DE L'EXÉCUTION DE LA REPRÉSENTATION MENTALE DE L'APPRENANT POUR LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ACdt1	AObj5	<	0	<i>Vrai</i>
ACdt2	AObj5	=	0	<i>Faux</i>
ACdt3	AObj5	>	0	<i>Faux</i>

TABLEAU 7-15 LES OBJETS MODIFIÉS LORS DE L'EXÉCUTION DE LA REPRÉSENTATION MENTALE DE L'APPRENANT POUR LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Id	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj5	Delta	It5	AObj1	ARes1	-3	1
AObj13	imaginaire 1	It10	AObj10	ARes5	0.86603	1
AObj11	réelle 1	It9	AObj10	ARes6	-0.5	1
AObj14	imaginaire 2	It10	AObj9	AUni1	-0.86603	1
AObj12	réelle 2	It9	AObj9	AUni2	-0.5	1

Signalons également que l'ordonnancement des tâches lors de l'exécution de la description de l'apprenant est le suivant⁹ :

ARes1, ACdt1, ACdt2, ACdt3, ARes5, ARes6, AUni1 et AUni2

Même si on peut noter une certaine ressemblance entre cet ordonnancement et celui présenté lors de l'exécution de la représentation mentale de l'expert, il ne faut pas pour autant en déduire une correspondance description par description, comme nous le verrons lors de l'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.

7.2.7 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales

La liste des paires de candidats à l'évaluation de la concordance est présentée au Tableau 7-16.

⁹ Cette liste permet de constater que, même si le formalisme ne contient pas explicitement l'ordre dans lequel les tâches doivent être accomplies, l'imbrication et l'interdépendance des descriptions font en sorte que l'ordre dans lequel les tâches sont accomplies s'apparente à celui voulu par l'apprenant (ou par l'expert le cas échéant).

TABLEAU 7-16 LA LISTE DES CANDIDATS À L'ÉVALUATION DE LA CONCORDANCE POUR LE
PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Item	App.	Exp.
It1	AObj1	EObj1
It2	AObj4	EObj2
It3	AObj3	EObj3
It4	AObj2	EObj4
It5	AObj5	EObj5
It6	AObj7	EObj6
It6	AObj7	EObj7
It6	AObj8	EObj6
It6	AObj8	EObj7
It7	AObj9	EObj9
It7	AObj9	EObj10
It7	AObj10	EObj9
It7	AObj10	EObj10
It8	AObj6	EObj8
It9	AObj11	EObj11
It9	AObj11	EObj13
It9	AObj12	EObj11
It9	AObj112	EObj13
It10	AObj13	EObj12
It10	AObj13	EObj14
It10	AObj14	EObj12
It10	AObj14	EObj14

Pour certains items, le nombre de possibilités d'appariement d'une description de l'expert avec une description de l'apprenant se limite à 1 comme c'est le cas de It1, It2, It3, It4, It5 et It8. Ceci est dû au fait que l'apprenant comme l'expert n'ont instancié qu'un objet à partir de chacun de ces items. Par contre, pour It6, It7, It9 et It10, plusieurs objets ont été instanciés à partir de chacun de ces items. Il faut donc générer toutes les combinaisons possibles, car on ne peut savoir a priori comment apparier ces objets.

On note que l'apprenant et l'expert ont utilisé les mêmes items, le même nombre de fois. Ceci est naturel si on se souvient que cet exemple correspond à une représentation mentale de l'apprenant qui concorde avec celle de l'expert. L'algorithme n'a donc formulé aucune hypothèse.

À partir de cette liste, le moteur cherche à établir la concordance entre les candidats qui constituent la liste, en chaînage arrière et en profondeur d'abord sur les facettes. Nous ne nous lancerons pas dans la description détaillée de la démarche du moteur, car nous avons vu au chapitre 5 que celle-ci peut être longue, même sur un problème aussi simple que celui du coureur. À titre d'information, l'ordre dans lequel les concordances sont établies est donné au Tableau 7-17.

TABLEAU 7-17 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES POUR LE PROBLÈME DE L'ÉQUATION DU SECOND DEGRÉ

Item	App.	Exp.
It2	AObj4	EObj2
It3	AObj3	EObj3
It4	AObj2	EObj4
It11	ARes1	ERes1
It5	AObj5	EObj5
/	ACdt3	ECdt1
It13	ARes2	ERes3
It6	AObj7	EObj7
It12	ARes3	ERes2
It6	AObj8	EObj6
/	ACdt2	ECdt2
It14	ARes4	ERes4
It8	AObj6	EObj8
/	ACdt1	ECdt3
It14	ARes6	ERes6
It9	AObj11	EObj11
/	AUni2	EUni1
It9	AObj12	EObj13
It15	ARes5	ERes5
It10	AObj13	EObj12
/	AUni1	EUni2
It10	AObj14	EObj14
It7	AObj9	EObj10
It7	AObj10	EObj9
It1	AObj1	EObj1

7.2.8 Commentaires

Ce problème permet de rendre compte de la possibilité offerte par le formalisme de traduire des choix de stratégies de type algorithmique, c'est-à-dire d'opter pour une solution plutôt qu'une autre en cours de résolution, suivant un résultat intermédiaire. Il permet également d'illustrer les conditions qui n'intervenaient pas pour le problème du coureur.

7.3 Le problème du triangle

7.3.1 Introduction

Il est des problèmes d'apparence simple qui sont très complexes à formaliser et à analyser. Nous avons choisi ce problème, car l'essentiel de l'énoncé réside dans la figure, ce qui peut rendre la représentation mentale associée à sa résolution très difficile à analyser et surtout très difficile à comparer avec celle de l'expert tant ce problème possède de symétrie. Il faut être sûr de comparer des choses comparables et, ceci, tout en s'affranchissant des calculs numériques, car tel est notre souhait. Ce problème permet également de montrer que le formalisme et le processus de validation gardent toute leur efficacité même si l'apprenant et l'expert n'effectuent pas les calculs dans le même ordre.

7.3.2 L'énoncé

Soit le triangle présenté ci-dessous, calculer les côtés et l'angle inconnus (l'échelle n'est pas respectée !)

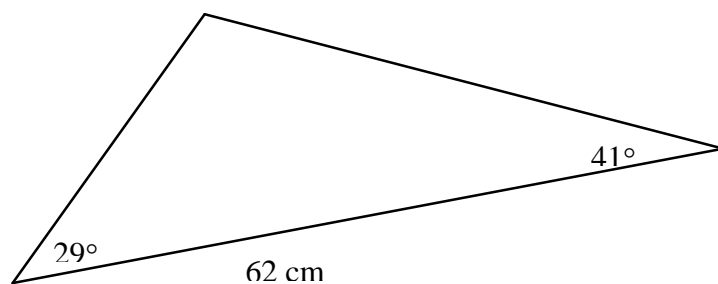


Figure 7-1 Le triangle de l'énoncé

7.3.3 La formalisation de la représentation mentale de l'expert

La solution préconisée par l'expert consiste à calculer l'angle manquant en appliquant la relation selon laquelle la somme des trois angles d'un triangle vaut 180° , puis à calculer le côté opposé à l'angle de 41° en appliquant la loi des sinus avec le côté connu et à calculer de la même manière le côté opposé à l'angle de 29° .

Cette stratégie de résolution conduit l'expert à dresser la liste des items nécessaires à la résolution de ce problème. Cette liste, sans bruit de fond, est présentée au Tableau 7-18 et les descriptions sont présentées dans le Tableau 7-19, le Tableau 7-20 le Tableau 7-21 et le Tableau 7-22.

TABEAU 7-18 LES ITEMS DISPONIBLES POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Item
It1	un triangle
It2	un côté
It3	un angle
It4	propriété «côté opposé»
It5	$\sin(X) / x = \sin(Y) / y$
It6	$A + B + C = 180$

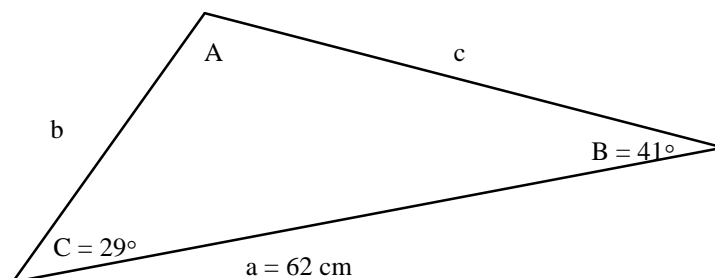


Figure 7-2 Le triangle vu par l'expert

TABLEAU 7-19 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj1	le triangle scalène	It1				
EObj2	le côté a	It2	EObj1	Énoncé	62	cm
EObj3	l'angle B	It3	EObj1	Énoncé	41	degrés
EObj4	l'angle C	It3	EObj1	Énoncé	29	degrés
EObj5	l'angle A	It3	EObj1	ERes1		
EObj6	le côté b	It2	EObj1	ERes2		
EObj7	le côté c	It2	EObj1	ERes3		

TABLEAU 7-20 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ERes1	$A + B + C = 180$	It6	[A=EObj5, B=EObj3, C=EObj4]	
ERes2	$\sin(X) / x = \sin(Y) / y$	It5	[X=EObj5, x=EObj2, Y=EObj3, y=EObj6]	ECdt1
ERes3	$\sin(X) / x = \sin(Y) / y$	It5	[X=EObj5, x=EObj2, Y=EObj4, y=EObj7]	ECdt2

TABLEAU 7-21 LES CONDITIONS UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ECdt1	EPro1	et	EPro2	Indéterminé
ECdt2	EPro1	et	EPro3	Indéterminé

TABLEAU 7-22 LES PROPRIÉTÉS UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Propriété	Sde	1 ^{er} Objet.	2 ^e Objet.	Provenance	État
EPro1	a côté opposé de A	It4	EObj2	EObj5	Énoncé	Vrai
EPro2	b côté opposé de B	It4	EObj6	EObj3	Énoncé	Vrai
EPro3	c côté opposé de C	It4	EObj7	EObj4	Énoncé	Vrai

Aucune action d'unification ni action de consultation n'ont été nécessaires à l'expert pour résoudre ce problème ; les tables correspondantes sont donc vides et non représentées.

7.3.4 L'exécution de la représentation mentale de l'expert

L'ordonnancement des tâches, lors de l'exécution de la représentation mentale de l'expert, est le suivant :

ECdt1, ECdt2, ERes1, ERes2 et ERes3.

Les conditions et les objets déterminés, lors de cette étape, sont présentés respectivement au Tableau 7-23 et au Tableau 7-24.

TABLEAU 7-23 LA DÉTERMINATION DES CONDITIONS ECdt1 ET ECdt2

Id	1^{er} Op.	Opérateur	2^e Op.	État
ECdt1	EPro1	et	EPro2	<i>Vrai</i>
ECdt2	EPro1	et	EPro3	<i>Vrai</i>

TABLEAU 7-24 LA DÉTERMINATION DES OBJETS EObj5, EObj6 ET EObj7

Id.	Objet	Sde	Pde	Prov.	Valeur	Unité
EObj5	l'angle A	It3	EObj1	ERes1	<i>110</i>	<i>180-degrés</i>
EObj6	le côté b	It2	EObj1	ERes2	<i>43,2861</i>	<i>cm</i>
EObj7	le côté c	It2	EObj1	ERes3	<i>31,9873</i>	<i>cm</i>

7.3.5 La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant

Supposons que le raisonnement de l'apprenant soit similaire à celui utilisé par l'expert mais avec une dénomination des côtés et des angles du triangle différentes. Une telle description est transcrite dans le Tableau 7-25, le, le Tableau 7-26 et le Tableau 7-27

TABLEAU 7-25 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj1	The triangle	It1				
AObj2	A	It3	AObj1	Énoncé	29	degrés
AObj3	B	It3	AObj1	ARes3		
AObj4	C	It3	AObj1	Énoncé	41	degrés
AObj5	a	It2	AObj1	ARes2		
AObj6	b	It2	AObj1	Énoncé	62	cm
AObj7	c	It2	AObj1	ARes1		

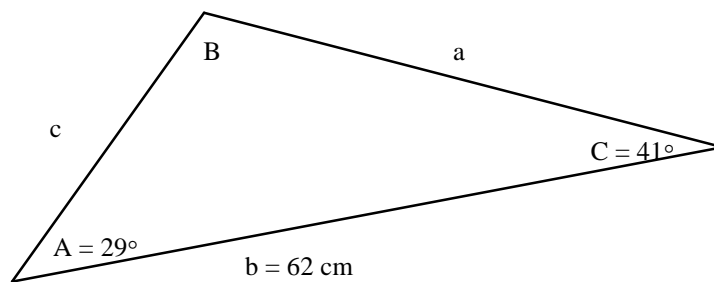


Figure 7-3 Le triangle vu par l'apprenant

TABLEAU 7-26 LES ACTIONS DE RÉOLUTION UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ARes1	$\sin(X) / x = \sin(Y) / y$	It5	$[X=AObj3, x=AObj6, Y=AObj4, y=AObj7]$	ACdt1
ARes2	$\sin(X) / x = \sin(Y) / y$	It5	$[X=AObj3, x=AObj6, Y=AObj2, y=AObj5]$	ACdt2
ARes3	$A + B + C = 180$	It6	$[A=AObj3, B=AObj4, C=AObj2]$	

TABLEAU 7-27 LES CONDITIONS UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ACdt1	APro2	et	APro3	Indéterminé
ACdt2	APro2	et	APro1	Indéterminé

TABLEAU 7-28 LES PROPRIÉTÉS UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Id.	Propriété	Sde	1 ^{er} Objet.	2 ^e Objet.	Provenance	État
APro1	côté opposé	It4	AObj5	AObj3	Énoncé	Vrai
APro2	côté opposé	It4	AObj6	AObj3	Énoncé	Vrai
APro3	côté opposé	It4	AObj7	AObj4	Énoncé	Vrai

Aucune action d'unification ni action de consultation n'ont été nécessaires à l'apprenant pour résoudre ce problème ; les tables correspondantes sont donc vides et non représentées.

7.3.6 L'exécution de la description donnée par l'apprenant

L'ordonnancement des tâches, lors de l'exécution de la représentation mentale de l'apprenant, est le suivant :

ACdt1, ACdt2, ARes3, ARes1 et ARes2

Les conditions et les objets déterminés lors de cette étape sont présentés respectivement au Tableau 7-29 et au Tableau 7-30

TABLEAU 7-29 LA DÉTERMINATION DES CONDITIONS ACDT1 ET ACDT2

Id.	1 ^{er} Op.	Opérateur	2 ^e Op.	État
ACdt1	APro2	et	APro3	<i>Vrai</i>
ACdt2	APro2	et	APro1	<i>Vrai</i>

TABLEAU 7-30 LA DÉTERMINATION DES OBJETS AOBJ5, AOBJ6 ET AOBJ7

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj3	B	It3	AObj1	ARes3	110	180-degrés ¹⁰
AObj5	a	It2	AObj1	ARes2	31,9873	cm
EObj7	c	It2	AObj1	ARes1	43,2861	cm

7.3.7 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales

La liste des paires de candidats à la concordance générée par le logiciel est donnée au Tableau 7-31.

¹⁰ Le système donne une unité qui est incohérente. Ceci vient du fait qu'il utilise la propriété selon-laquelle la somme des sommets d'un triangle vaut 180°, ou 2π radians. Cette propriété énoncée sous forme de relation ne contient pas l'unité, par conséquent le système ne sait pas résoudre ce genre d'équation aux dimensions.

TABLEAU 7-31 LA LISTE DES CANDIDATS À L'ÉVALUATION DE LA CONCORDANCE POUR LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Item	App.	Exp.
It1	AObj1	EObj1
It2	AObj5	EObj2
It2	AObj5	EObj6
It2	AObj5	EObj7
It2	AObj6	EObj2
It2	AObj6	EObj6
It2	AObj6	EObj7
It2	AObj7	EObj2
It2	AObj7	EObj6
It2	AObj7	EObj7
It3	AObj2	EObj3
It3	AObj2	EObj4
It3	AObj2	EObj5
It3	AObj3	EObj3
It3	AObj3	EObj4
It3	AObj3	EObj5
It3	AObj4	EObj3
It3	AObj4	EObj4
It3	AObj4	EObj5
It4	APro1	EPro1
It4	APro1	EPro2
It4	APro1	EPro3
It4	APro2	EPro1
It4	APro2	EPro2
It4	APro2	EPro3
It4	APro3	EPro1
It4	APro3	EPro2
It4	APro3	EPro3
It5	ARes1	ERes2
It5	ARes1	ERes3
It5	ARes2	ERes2
It5	ARes2	ERes3
It6	ARes3	ERes1

L'ordonnement des concordances établies est donné au Tableau 7-32.

TABLEAU 7-32 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES POUR LE PROBLÈME DU TRIANGLE

Item	App.	Exp.
It2	AObj6	EObj2
It3	AObj4	EObj3
It3	AObj2	EObj4
It6	ARes3	ERes1
It3	AObj3	EObj5
It4	APro2	EPro1
It4	APro1	EPro3
/	ACdt2	ECdt2
It5	ARes2	ERes3
It2	AObj5	EObj7
It4	APro3	EPro2
/	ACdt1	ECdt1
It5	ARes1	ARes2
It2	AObj7	EObj6
It1	AObj1	EObj1

7.3.8 Commentaires

Ce problème permet d'illustrer les propriétés qui n'avaient pas été utilisées jusque-là. Il présente un cas où le nombre de candidats générés est très important par rapport au nombre d'items qui interviennent (33 paires de candidats pour 6 items). Ceci provient du degré de symétrie entre les angles et les côtés qui ne sont pas explicitement identifiés dans l'énoncé. La liste des items ne permet pas non plus de les identifier sans ambiguïté. Ce grand nombre de candidats rend l'évaluation beaucoup plus longue, mais le formalisme permet d'apparier correctement les descriptions qui concordent.

7.4 Le problème du coureur

7.4.1 Introduction

Cet exemple reprend le problème qui a servi d'illustration aux chapitres 4 et 5. Il a pour but de montrer le fonctionnement du processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant lorsque cette dernière est erronée. Pour cela, nous reprenons la représentation mentale de l'expert telle que nous l'avons présentée pour illustrer le formalisme au chapitre 4, ce qui ne modifie rien quant à l'exécution de la représentation mentale de l'expert ni dans l'ordonnancement des tâches, ni dans les valeurs et unités obtenues. Par contre, la représentation mentale de l'apprenant est quelque peu modifiée.

7.4.2 La formalisation de la représentation mentale erronée de l'apprenant

La représentation mentale de l'apprenant est pratiquement identique à celle utilisée pour illustrer l'exécution d'une représentation mentale au chapitre 5. Afin de rendre la représentation mentale de l'apprenant erronée, nous supposons qu'il calcule le périmètre, non pas avec l'équation $p = 2 * \pi * r$, instance de l'item numéro 8, mais avec l'équation $p = \pi * r^2$, instance de l'item 11 qui fait partie du bruit de fond, comme nous l'avons vu au Tableau 4-1, à la page 57. Ce changement se traduit par la description d'une nouvelle action ARes2 qui remplace la précédente. Tout le reste de la description de l'apprenant est identique à ce que nous avons présenté au chapitre 5. La description erronée de l'apprenant est reprise dans son intégralité à la Figure 7-4.

Id.	Item
It1	un cercle
It2	un rayon
It3	un périmètre
It4	un corps en mouvement
It5	une vitesse moyenne
It6	un temps
It7	une distance
It8	$v = d / t$
It9	$p = 2 * \pi * r$
It10	$p = \pi * r^2$

T1 : items disponibles

Id.	Objet	Sde	Pde	Prov.	Valeur	Unité
AObj1	le coureur	It4				
AObj2	d	It7	AObj1	AUn1		
AObj3	t	It6	AObj1	Énoncé	100	s
AObj4	v	It5	AObj1	ARes1		
AObj5	la piste	It1				
AObj6	r	It2	AObj5	Énoncé	100	m
AObj7	p	It3	AObj5	ARes2		

T2 : objets

Id.	Relation	Sde	[Associations]	Dép.
ARes1	$v = d / t$	It8	[v = AObj4, d = AObj2, t = AObj3]	
ARes2	$p = \pi * r^2$	It10	[p = AObj7, r = AObj6]	

T3 : actions de résolution

Id.	Ressource	Sde	[Entrées]	Sortie	Dép.

T4 : action de consultation

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dép.
AUn1	AObj7	AObj2	égalité	

T5 : action d'unification

Id.	1 ^{er} Opérande	Opérateur	2 ^e Opérande	État

T6 : condition

Id.	Propriété	Sde	1 ^{er} Objet	2 ^e objet	Prov.	État

T7 : propriété

Figure 7-4 La description erronée de l'apprenant pour le problème du coureur

La description de l'apprenant reste cohérente, car l'action de résolution ERes2 existe toujours, c'est juste l'équation qui a changé. L'exécution de la nouvelle description de l'apprenant s'effectue dans l'ordre suivant :

ARes2, AUni1 et ARes1.

Cet ordre est le même que celui que nous aurions obtenu si nous avions exécuté la représentation mentale correcte de l'apprenant présentée au chapitre 5. L'exécution de la représentation mentale erronée conduit à la détermination des objets AObj7, AObj2 et AObj4, comme le montre le Tableau 7-33.

TABLEAU 7-33 LA DÉTERMINATION DES OBJETS AOBJ7, AOBJ2 ET AOBJ4 LORS DE L'EXÉCUTION DE LA REPRÉSENTATION MENTALE ERRONÉE DE L'APPRENANT

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj7	p	It3	AObj5	ARes2	31445,6	m^2
AObj2	d	It7	AObj1	AUni1	31445,6	m^2
AObj4	v	It5	AObj1	ARes1	314,456	m^2/s

L'exécution de la représentation mentale correcte aurait conduit à des valeurs et des unités en accord avec celles déterminées lors de l'exécution de la représentation mentale de l'expert. En ce qui concerne la représentation erronée, nous pouvons constater que, non seulement les valeurs ne correspondent pas avec celles trouvées par l'expert, mais les unités non plus.

7.4.3 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales

Pour résoudre ce problème, l'expert n'a instancié qu'une fois chaque concept. Malgré le caractère erroné de sa représentation mentale, l'apprenant n'a lui aussi instancié qu'une seule fois chacun des concepts qu'il utilise. La liste des candidats est identique à celle présentée au Tableau 5-5, lors de l'évaluation de la concordance entre l'expert et l'apprenant ayant une représentation

mentale correcte, car l'erreur de l'apprenant ne porte pas sur les objets mais sur une action de résolution. En effet, l'apprenant a utilisé l'item 10 à la place de l'item 8, mais cette information n'est pas directement accessible à l'algorithme. Le regroupement des candidats par paire (objets, actions et dépendances) permet de constater que l'item 8 est utilisé par l'expert mais pas par l'apprenant, alors que l'item 10 est utilisé par l'apprenant mais pas par l'expert. L'algorithme constate que les deux descriptions, instances de ces items, sont de même nature. En effet, il s'agit de deux actions de résolution. À partir de ces constatations, l'algorithme émet donc deux hypothèses :

1. L'apprenant a « confondu » l'item 8 et l'item 10. Ce qui signifie, en terme d'évaluation de concordance, que l'algorithme va essayer d'établir la concordance de tout le reste, en supposant que les deux descriptions relatives aux items 8 et 10, c'est-à-dire ARes2 et ERes1, concordent entre elles.
- Hyp1 : les actions de résolution ARes2 et ERes1 ont été confondues.
2. L'apprenant n'a pas utilisé d'actions de résolution là où l'expert utilise ERes1. Ce qui signifie en terme d'évaluation de concordance, que l'algorithme va essayer d'établir la concordance de tout le reste en ignorant la description ERes1.
- Hyp2 : l'action de résolution ERes1 est isolée.

Compte tenu de ces deux hypothèses, l'algorithme lance le processus d'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales.

La concordance entre AObj5 et EObj1 ne peut être établie, car ces objets ont des parties constituantes dont la concordance n'a pas encore été établie. AObj6 et EObj2 concordent, car ils proviennent tous les deux de l'énoncé et leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont égales. Les objets AObj7 et EObj3 concordent si leur provenance concorde. Or, justement, les provenances sont respectivement ARes2 et ERes1 qui, selon l'hypothèse Hyp1, ont été confondues de la part de l'apprenant. Donc, moyennant cette hypothèse, les deux objets AObj7 et EObj3 concordent. La

concordance des paires AObj1 et EObj4 ne peut pas être établie, car ces objets ont des parties constituantes dont la concordance n'a pas encore été établie. Les objets AObj4 et EObj5 concordent si leur provenance concordent, c'est-à-dire ARes1 et ERes2. Ces deux actions de résolution étant indépendantes, elles concordent si leurs facettes **[Associations]** contiennent des objets qui concordent deux à deux. Ces facettes contiennent respectivement AObj4, AObj2 et AObj3 pour ARes1 et EObj5, EObj7 et EObj6 pour ERes2. Comme le but est d'établir la concordance de la paire AObj4, EObj5, l'algorithme ne tient pas compte de ces objets dans les associations. Les objets AObj2 et EObj7 concordent entre eux si leur provenance concorde, c'est-à-dire si AUni1 et EUni1 concordent. Pour cela, il faut que les facettes **Connu** concordent d'une part et que, d'autre part, les facettes **Affecté** concordent. Les facettes **Connu** sont AObj7 et EObj3 dont la concordance a été établie d'après l'hypothèse Hyp1. Les facettes **Affecté** sont AObj2 et EObj7 dont on tente de d'établir la concordance. De là, l'algorithme peut conclure à la concordance des actions d'unification AUni1 et EUni1, moyennant l'hypothèse Hyp1, car celle-ci a été utilisée. Les objets AObj3 et EObj6 concordent car ils proviennent de l'énoncé et leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont égales entre elles. L'algorithme en déduit donc la concordance des actions ARes1 et ERes2, encore selon l'hypothèse Hyp1, car elle a été utilisée dans les associations pour la paire AObj2, EObj7. De là, l'algorithme déduit la concordance de AObj4 et EObj5. Le cycle se termine et un nouveau reprend, car des concordances ont pu être établies. Les objets AObj5 et EObj1 ont des parties constituantes qui concordent toutes entre elles (AObj6 avec EObj2, AObj7 avec EObj3 d'après Hyp1). L'algorithme en déduit que AObj5 et EObj1 concordent d'après l'hypothèse Hyp1. Les objets AObj1 et EObj4 ont également des parties constituantes qui concordent toutes entre elles (AObj2 avec EObj7 d'après Hyp1, AObj3 avec EObj6 et AObj4 avec EObj5 d'après Hyp1). Donc AObj1 et EObj4 concordent selon l'hypothèse Hyp1, utilisée deux fois. Le cycle se termine, un nouveau est entrepris, mais il n'amène rien de nouveau. Le processus s'arrête de ce fait.

Le processus d'évaluation de la concordance est illustré par le Tableau 7-34, qui présente l'ordre dans lequel les concordances sont établies ainsi que les hypothèses utilisées pour chacune des concordances établies.

TABLEAU 7-34 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES POUR LE PROBLÈME DU COUREUR (ERRONÉ)

Orde	Item	App.	Exp.	Hypothèses utilisées
1	It2	AObj6	EObj2	
2	It3	AObj7	EObj3	Hyp1
3	/	AUni1	EUni1	Hyp1
4	It7	AObj2	EObj7	Hyp1
5	It6	AObj3	EObj6	
6	It9	ARes1	ERes2	Hyp1
7	It5	AObj4	EObj5	Hyp1
8	It4	AObj5	EObj1	Hyp1
9	It1	AObj1	EObj4	Hyp1, Hyp1

7.4.4 Commentaires

Ce problème fait intervenir une conception erronée de l'apprenant. Cette erreur est détectée grâce au nombre d'instanciation des items qui diffère chez l'apprenant et chez l'expert. Cette constatation conduit à la génération de deux hypothèses. Le processus de validation a réussi à montrer que l'hypothèse qu'il a émise (Hyp1) permet de déterminer la concordance de toutes les autres descriptions. Ceci permet de conclure que c'est bien cette erreur (la confusion de deux actions de résolution) qui a été commise par l'apprenant. La seconde hypothèse n'a pas été utilisée ; il est donc très peu probable qu'elle soit en cause.

Notons que, dans le Tableau 7-34, n'apparaissent pas les actions ARes2 et ERes1. Ceci est dû au fait qu'elles ne concordent pas, mais le fait de les confondre constitue l'hypothèse Hyp1.

7.5 Le problème de thermodynamique

7.5.1 Introduction

Les problèmes de thermodynamique font souvent intervenir l'utilisation de tables concernant les propriétés des corps qui entrent en jeu dans le problème. Une autre caractéristique importante des problèmes de thermodynamique réside dans la nécessité d'exploiter les non-dits de l'énoncé et de faire des hypothèses sur ce qui n'est pas précisé. Ces considérations se retrouvent dans [BHASKAR ET SIMON, 1977] et dans [TISSEAU, 1990 et 1992] : Bhaskar et Simon soulignent que la difficulté essentielle dans la résolution de problèmes de thermodynamique provient du contenu sémantique de l'énoncé. Tisseau se heurte à ce problème en faisant la transcription automatique sous forme algébrique d'un énoncé de problème de thermodynamique donné en langage naturel. Nous avons choisi un problème tiré de l'ouvrage de référence utilisé dans le cours de thermodynamique [VAN WYLEN ET COLL., 1992, page 53, exemple 3.4].

7.5.2 L'énoncé

Un récipient rigide contient de la vapeur saturée d'ammoniac à 20 °C. De la chaleur est fournie au système jusqu'à ce que la température atteigne 40 °C. Quelle est la pression finale dans le récipient ?

7.5.3 La formalisation de la représentation mentale de l'expert

Dans l'ouvrage de référence, cet exercice est résolu et nous considérons cette solution comme étant celle de l'expert. La solution proposée est détaillée comme suit :

Puisque le volume ne varie pas au cours de l'évolution, le volume massique demeure aussi constant. D'après les tables de l'ammoniac (table A.2) :

$$v_1 = v_2 = 0.1494 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Comme v_g à 40 °C est inférieur à 0.1494 m³/kg, il est évident qu'au stade final l'ammoniac est à l'état de vapeur surchauffée. En interpolant entre les colonnes de 900 et 1000kPa de la table A.2.2, on obtient : $P = 938 \text{ kPa}$.

Cette explication peut être transcrite en une succession d'étapes de la manière suivante :

1. Chercher le volume massique v_1 correspondant à l'état initial dans la table de l'ammoniac en vapeur saturée en consultant la table A.2.1.
2. Puisque la transformation est isochore, le volume massique à l'état final est égal au volume massique à l'état initial.
3. Déterminer le volume massique pour de la vapeur saturée (v_g) correspondant à l'état final.
4. Si le volume massique à l'état final v_2 est supérieur à v_g , déterminer la valeur de la pression P à l'état final en consultant la table thermodynamique A.2.2.

Cette transcription permet d'élaborer la liste des items utilisés par l'expert pour résoudre ce problème. Elle est donnée au Tableau 7-35, sans adjonction de bruit de fond.

TABLEAU 7-35 LES ITEMS DISPONIBLES POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Item
It1	une transformation
It2	un état initial
It3	un état final
It4	un volume massique
It5	une température
It6	une pression
It7	Table A.2.1
It8	Table A.2.2
It9	Transformation isochore

La transcription de la démarche de résolution selon le formalisme que nous proposons se retrouve dans le Tableau 7-36, le Tableau 7-37, le Tableau 7-38, le Tableau 7-39 et le Tableau 7-40

TABLEAU 7-36 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj1	la transformation	It1				
EObj2	l'état initial	It2	EObj1			
EObj3	v_1	It4	EObj2	ECsl1		
EObj4	t_1	It5	EObj2	Énoncé	20	°C
EObj5	l'état final	It3	EObj1			
EObj6	v_2	It4	EObj5	EUn1		
EObj7	t_2	It5	EObj5	Énoncé	40	°C
EObj8	p_2	It6	EObj5	ECsl3		
EObj9	v_g	It4	EObj5	ECsl2		

TABLEAU 7-37 L'ACTION D'UNIFICATION UTILISÉE PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Connu	Affecté	Relation	Dépendance
EUn1	EObj3	EObj6	égalité	EPro1

TABLEAU 7-38 LES ACTIONS DE CONSULTATION UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Ressource	Sde	[Entrées]	Sortie	Dépendance
ECsl1	A2.1	It7	[EObj4]	EObj3	
ECsl2	A2.1	It7	[EObj7]	EObj9	
ECsl3	A2.2	It8	[EObj6]	EObj8	ECdt1

TABLEAU 7-39 LES CONDITIONS UTILISÉES PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Objet 1	Opérateur	Objet 2	État
ECdt1	EObj9	<	EObj6	Indéterminé

TABLEAU 7-40 LA PROPRIÉTÉ UTILISÉE PAR L'EXPERT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Propriété	Sde	Obj1	Obj2	Prov.	État
EPro1	la transformation est isochore	It9	EObj1		Énoncé	Vrai

Aucune action de résolution n'a été nécessaire à l'expert pour résoudre ce problème ; la table correspondante est donc vide et non représentée.

7.5.4 L'exécution de la description donnée par l'expert

L'ordre dans lequel les tâches d'exécution sont déclenchées est le suivant :

ECsl1, ECsl2, EUni1, ECdt1 et ECsl3

Les descriptions modifiées lors de la résolution du problème sont présentées au Tableau 7-41 et au Tableau 7-42.

TABLEAU 7-41 LES OBJETS MODIFIÉS LORS DE LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE PAR L'EXPERT

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
EObj3	v_1	It4	EObj2	ECsl1	0,1494	kg/m ³
EObj9	v_g	It4	EObj5	ECsl2	0,0833	kg/m ³
EObj6	v_2	It4	EObj5	EUni1	0,1494	kg/m ³
EObj8	p_2	It6	EObj5	ECsl3	938	kPa

TABLEAU 7-42 LA CONDITION MODIFIÉE LORS DE LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE PAR L'EXPERT

Id.	Objet 1	Opérateur	Objet 2	État
ECdt1	EObj9	<	EObj6	Vrai

7.5.5 La formalisation de la représentation mentale de l'apprenant

Nous avons choisi de représenter le modèle mental d'un apprenant qui n'a pas considéré le fait que la transformation est isochore. Il a donc directement cherché la valeur du volume massique pour l'état final dans la table A.2.1. Le reste de la démarche est similaire à celle de l'expert. Ceci conduit à la formalisation de la représentation mentale telle que la présentent le Tableau 7-43, le Tableau 7-44 et le Tableau 7-45.

TABLEAU 7-43 LES OBJETS UTILISÉS PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj1	l'état final	It3	AObj8			
AObj2	t_2	It5	AObj1	Énoncé	40	°C
AObj3	v_2	It4	AObj1	ACsl3		
AObj4	p_2	It6	AObj1	ACsl2		
AObj5	l'état initial	It2	AObj8			
AObj6	v_g	It4	AObj1	ACsl1		
AObj7	t_1	It5	AObj5	Énoncé	20	°C
AObj8	Apport de chaleur	It1				

TABLEAU 7-44 LES ACTIONS DE CONSULTATION UTILISÉES PAR L'APPRENANT POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Ressource	Sde	[Entrées]	Sortie	Dépendance
ACsl1	A2.1	It7	[AObj2]	AObj6	
ACsl2	A2.2	It8	[AObj3]	AObj4	ACdt1
ACsl3	A2.1	It7	[AObj7]	AObj8	

TABLEAU 7-45 LA CONDITION UTILISÉE PAR L'APPRENANT POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Id.	Objet 1	Opérateur	Objet 2	État
ACdt1	AObj6	<	AObj3	Indéterminé

7.5.6 L'exécution de la description faite par l'apprenant

L'exécution de la représentation mentale de l'apprenant conduit à l'ordonnement des tâches suivant :

ACsl1, ACsl3 ACdt1, ACsl2

Le Tableau 7-46 et le Tableau 7-47 présentent les descriptions modifiées lors de l'exécution de la représentation mentale de l'apprenant.

TABLEAU 7-46 LES OBJETS MODIFIÉS LORS DE LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE PAR L'APPRENANT

Id	Objet	Sde	Pde	Provenance	Valeur	Unité
AObj6	v_g	It4	AObj1	ACsl1	0,0833	kg/m ³
AObj3	v_2	It4	AObj1	ACsl3	0,1494	kg/m ³
AObj4	p_2	It6	AObj1	ACsl2	938	kPa

TABLEAU 7-47 LA CONDITION MODIFIÉE LORS DE LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE PAR L'APPRENANT

Id	Objet 1	Opérateur	Objet 2	État
ACdt1	AObj6	<	AObj3	Vrai

7.5.7 L'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales

TABLEAU 7-48 LA LISTE DES CANDIDATS À L'ÉVALUATION DE LA CONCORDANCE POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

Item	App.	Exp.
It1	AObj8	EObj1
It2	AObj5	EObj2
It3	AObj1	EObj5
It4	AObj3	EObj3
It4	AObj3	EObj6
It4	AObj3	EObj9
It4	AObj6	EObj3
It4	AObj6	EObj6
It4	AObj6	EObj9
It5	AObj2	EObj4
It5	AObj2	EObj7
It5	AObj7	EObj4
It5	AObj7	EObj7
It6	AObj4	EObj8

En établissant cette liste, le moteur constate plusieurs choses : l'item 4 a été utilisé une fois de moins par l'apprenant que par l'expert ; l'expert utilise une action d'unification, alors que l'apprenant n'en utilise aucune ; et l'item 9 n'a pas été utilisé par l'apprenant. Ces deux dernières constatations amènent l'algorithme à poser deux hypothèses :

- Hyp1 : la propriété EPro1 est isolée.
- Hyp2 : l'action d'unification Euni1 est isolée.

En ce qui concerne l'item 4 (un volume massique), aucune hypothèse ne peut être posée immédiatement car, bien que l'algorithme ait détecté qu'il y a deux instances de cet item chez

l'apprenant et trois chez l'expert, il ne peut pas savoir, à ce stade, lequel des trois objets instanciés par l'expert est isolé (il pourrait d'ailleurs y avoir plusieurs objets isolés). Une hypothèse pourra être générée plus tard, si l'algorithme arrive à établir la concordance de deux de ces trois objets. En effet, dans ce cas, il pourra conclure que le troisième est celui qui est isolé. L'algorithme émet trois supputations, telles que présentées à la section 5.4.1, page 74, signifiant que les objets EObj3, EObj6 et EObj9, tous trois instances de It4, risquent d'être isolés.

- Sup1 : L'objet EObj3 est isolé.
- Sup2 : L'objet EObj6 est isolé.
- Sup3 : L'objet EObj9 est isolé.

Compte tenu de ces deux hypothèses, l'algorithme lance le processus d'évaluation de la concordance entre les deux représentations mentales à partir de la liste des candidats (Tableau 7-43).

La concordance entre AObj8 et EObj1 ne peut être évaluée, car ces objets possèdent tous deux des parties constituantes dont la concordance n'a pas encore été établie. Il en est de même pour la paire AObj5 et EObj2 et la paire AObj1 et EObj5. La paire suivante est AObj3 et EObj3. AObj3 provient de l'action de consultation ACsl3 et EObj3 provient de l'action de consultation ECsl1. Ces deux actions proviennent du même item (It7). Elles concordent si, d'une part leurs facettes **[Entrées]** concordent et d'autre part leurs facettes **Sortie** concordent également : les facettes **[Entrées]** sont AObj2 pour ACsl3 et EObj4 pour ECsl1. Ces deux objets ne concordent pas car, même s'ils proviennent tous les deux de l'énoncé, leurs facettes **Valeur** ne sont pas égales.

Ensuite, viennent les candidats AObj3 et EObj6. EObj6 provient d'une action d'unification EUni1 qui, selon l'hypothèse Hyp2, est isolée. L'algorithme déduit donc, compte tenu de cette hypothèse, que AObj3 et EObj6 concordent. Les paires contenant un de ces deux objets sont donc retirées de la liste des candidats et la supputation qui porte sur EObj6 (Sup2) est supprimée. La paire de candidats suivante est AObj6 et EObj3. Ces objets concordent si leur provenance, respectivement ACsl1 et ECsl1, concordent. Ces deux actions de consultation sont des instances du même item (It7). Mais les facettes **[Entrées]** (AObj2 et EObj4) ne concordent pas, pour la même raison que celle évoquée précédemment.

Vient le tour de la paire AObj6 et EObj9. Ces objets proviennent respectivement de ACsl1 et de ECsl2, dont les facettes **[Entrées]** ne contiennent qu'un objet chacune, soit respectivement AObj2 et EObj7. La concordance de ces derniers est établie, car ils proviennent tous les deux de l'énoncé et leurs facettes **Valeur**, d'une part, et **Unité**, d'autre part, sont identiques. Les paires contenant l'objet AObj2 ou EObj7 sont donc retirées de la liste des candidats. Les facettes **Sortie** correspondent aux candidats dont la concordance est en cours d'établissement ; elles ne sont, de ce fait, pas considérées. Ceci conduit donc à l'établissement de la concordance entre ACsl3 et ECsl2 qui, elle même, conduit à l'établissement de la concordance entre AObj6 et EObj9. Les paires contenant un de ces deux objets sont retirées de la liste des candidats et la supputation qui porte sur EObj9 (Sup3) est supprimée. Comme il ne reste plus qu'une supputation impliquant l'item It4 (Sup1), cette supputation est promue au rang d'hypothèse et devient :

- Hyp3 : l'objet EObj3 est isolé.

La paire suivante, dans la liste des candidats, réunit AObj7 et EObj4. Ces deux objets concordent puisqu'ils proviennent de l'énoncé et leurs facettes **Valeur** et **Unité** sont respectivement égales.

L'algorithme cherche ensuite à établir la concordance de la dernière paire de la liste qui unit AObj4 et EObj8. Ces deux objets proviennent chacun d'une action de consultation, respectivement ACsl2 et ECsl3. D'une part, ces deux actions sont des instances du même item (It8). La concordance des facettes **[Entrées]** (respectivement AObj3 et EObj6) a été établie précédemment d'après l'hypothèse Hyp2 et comme les facettes **Sortie** correspondent aux objets dont l'établissement de la concordance est en cours, elles ne sont pas considérées. D'autre part, ces deux actions dépendent chacune d'une condition (ACdt1 pour ACsl2 et ECdt1 pour ECsl3). Les deux conditions concordent, car la concordance des facettes **Opérande1** (respectivement AObj6 et EObj9) a été établie précédemment, ainsi que celle des facettes **Opérande2** (respectivement AObj3 et EObj6) d'après l'hypothèse Hyp2. De plus, les facettes **Opérateurs** sont identiques. L'algorithme établit donc la concordance entre ACdt1 et ECdt1 selon l'hypothèse Hyp2, ce qui l'amène à établir la concordance entre ACsl2 et ECsl3, également selon l'hypothèse Hyp2 (utilisée deux fois) et, de là, il établit la concordance entre les objets AObj4 et EObj8 toujours selon l'hypothèse Hyp2 utilisée deux fois.

Là dessus, se termine le premier cycle car chaque paire de candidats a été traitée. Comme de nouvelles concordances ont été établies, l'algorithme parcourt à nouveau la liste des candidats restants. La concordance entre AObj8 et EObj1 ne peut toujours pas être établie, car ces deux objets possèdent encore des parties constituantes dont la concordance n'a pas été établie. Les objets AObj5 et EObj2 concordent, car la concordance de la partie constituante AObj7 de AObj5 a été établie avec EObj4 et, d'après l'hypothèse Hyp3, l'autre partie constituante EObj3 de EObj2 est isolée. Il en est de même pour les candidats. Toutes les parties constituantes des objets AObj1 et EObj5 concordent deux à deux, dont certaines d'après l'hypothèse Hyp2, donc AObj1 et EObj5 concordent, selon Hyp2 (utilisée trois fois). Le cycle se termine et un nouveau reprend. Cette fois, les concordances entre les parties constituantes des objets AObj8 et EObj1 a été établie, certaines selon Hyp2 et une selon Hyp3. L'algorithme établit donc la concordance entre AObj8 et EObj1, selon les hypothèses Hyp3 (utilisée une fois) et Hyp2 (utilisée trois fois). Le cycle se termine et la liste des candidats est vide, ce qui provoque l'arrêt de l'algorithme. En résumé, l'ordre d'établissement des concordances est repris au Tableau 7-49.

TABLEAU 7-49 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES LORS DE L'ÉVALUATION DE LA CONCORDANCE POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE

App.	Exp.	Item	Hypothèses utilisées
AObj3	EObj6	It4	Hyp2
Élimination de la supputation qui porte sur EObj6 : Sup2			
AObj2	EObj7	It5	
ACsl1	ECsl2	It7	
AObj6	EObj9	It4	
Élimination de la supputation qui porte sur EObj9 : Sup3, la supputation Sup1 est promue au rang d'hypothèse Hyp3			
AObj7	EObj4	It5	
ACdt1	ECdt1	/	Hyp2
ACsl2	ECsl3	It8	Hyp2, Hyp2
AObj4	EObj8	It6	Hyp2, Hyp2
AObj5	EObj2	It2	Hyp3
AObj1	EObj5	It3	Hyp2, Hyp2, Hyp2
AObj8	EObj1	It1	Hyp3, Hyp2, Hyp2, Hyp2

7.5.8 Commentaires

Il reste deux actions de consultation dont la concordance n'a pas pu être établie : ACsl3 et ECsl1. Ces deux actions jouent pourtant le même rôle au sein des représentations mentales de l'apprenant et de l'expert. Pour l'apprenant, elle sert à obtenir le volume massique correspondant à l'état final, à partir de la température de l'état final. Pour l'expert, combinée avec EUni1 et indirectement avec EPro1, elle conduit également à la détermination du volume massique à l'état final. L'évaluation de la concordance entre ACsl3 et ECsl1 bloque, car les facettes **Sortie**, respectivement AObj3 et EObj3, ne concordent pas entre elles. Mais comme l'objet EObj3 est relié à l'objet EObj6 par la relation « égalité » dans l'action d'unification EUni1, ce blocage peut être levé. Une telle règle, permettant d'établir la concordance d'objets en s'affranchissant des

unifications dont la relation est « égalité », peut facilement être ajoutée au moteur qui est en charge de l'évaluation de la concordance. C'est ce que nous avons fait et, dans le cas qui nous intéresse, le résultat est satisfaisant.

Il est à noter que la représentation mentale de l'apprenant, telle qu'elle est formalisée dans cet exemple n'est pas cohérente, car elle ne respecte pas le premier test de cohérence présenté au paragraphe 5.2, page 69. En effet, AObj7 fait l'objet d'une description, mais n'est utilisé dans aucune autre description. Ceci dit, cela n'a nullement empêché le processus de validation d'établir la concordance de cet objet avec EObj4 une fois ce test rendu inopérant. Ce résultat confirme que le non respect de ce critère n'a pas la même gravité que celui des autres critères de cohérence. Nous avons volontairement laissé AObj7, qui représente la température à l'état initial, pour plusieurs raisons. La première est purement technique : enlever cette description amène l'algorithme à générer deux supputations supplémentaires, qui portent sur l'item It5, car l'expert utilise deux fois cet item, alors que l'apprenant ne l'utilise qu'une seule fois.

- Sup4 : l'objet EObj4 est isolé.
- Sup5 : l'objet EObj7 est isolé.

La seconde est que, si AObj7 est supprimé, AObj5, qui correspond à l'état initial, n'a plus aucune utilité et doit donc être supprimé également. Ce qui amène l'algorithme à générer une hypothèse supplémentaire (avec une numérotation des hypothèses différentes) :

- Hyp1 : l'objet EObj2 est isolé.

L'ajout de ces deux supputations et de cette hypothèse aurait alourdi l'exposé que nous avons fait pour décrire le processus d'établissement des concordances. Cependant, si le premier test de cohérence est appliqué, cela nécessite la suppression de AObj5 et de AObj7 dans le Tableau 7-43 (il faut noter que la numérotation des hypothèses n'est pas la même que celle utilisée précédemment, car l'algorithme ne les génère pas dans le même ordre).

L'ordre des concordances obtenu à partir de cette nouvelle description du problème par l'apprenant est présenté au Tableau 7-50.

TABLEAU 7-50 L'ORDRE D'ÉTABLISSEMENT DES CONCORDANCES POUR LE PROBLÈME DE THERMODYNAMIQUE DANS LE CAS D'UNE REPRÉSENTATION MENTALE DE L'APPRENANT ERRONÉE MAIS COHÉRENTE

Ordre	App.	Exp.	Item	Hypothèses utilisées
1	AObj3	EObj6	It4	Hyp3
2	AObj2	EObj7	It5	
Élimination de la supputation portant sur EObj7 : Sup5, la supputation Sup4 est promue au rang d'hypothèse Hyp4				
3	ACsl1	ECsl2	It7	
4	AObj6	EObj9	It4	
La supputation Sup1 est promue au rang d'hypothèse Hyp5				
5	ACdt1	ECdt1	/	Hyp3
6	ACsl2	ECsl3	It8	Hyp3, Hyp3
7	AObj4	EObj8	It6	Hyp3, Hyp3
8	AObj1	EObj5	It3	Hyp3, Hyp3, Hyp3
9	AObj8	EObj1	It1	Hyp1, Hyp3, Hyp3, Hyp3

avec comme hypothèses :

- Hyp1 : l'objet EObj2 est isolé.
- Hyp2 : la propriété EPro1 est isolée.
- Hyp3 : l'action d'unification EUni1 est isolée.
- Hyp4 : l'objet EObj4 est isolé.
- Hyp5 : l'objet EObj3 est isolé.

Ce problème permet de distinguer les deux niveaux d'analyse effectués par l'algorithme : les hypothèses permettent d'établir des concordances et les supputations sont des hypothèses potentielles qu'il faut vérifier avant de les utiliser pour établir des concordances.

7.6 Conclusion

Ces exemples montrent que la généricité du formalisme et du processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant permet de traiter des problèmes dans des domaines variés.

Le formalisme et le processus permettent de reconnaître une représentation mentale d'apprenant correcte et d'établir sa concordance avec celle de l'expert bien qu'elles soient différentes l'une de l'autre. Ils permettent également d'identifier des représentations mentales erronées, d'émettre des hypothèses quant à la source de l'erreur et ceci même dans le cas d'une réponse numérique correcte. En effet, le problème concernant la thermodynamique, qui simule une représentation mentale de l'apprenant erronée ou tout du moins incomplète bien que la réponse numérique (la valeur de la pression à l'état final) soit correcte, souligne le pouvoir d'analyse de la représentation mentale dont fait preuve le processus de validation. Il ne fait pas que comparer la démarche de l'apprenant à une liste préétablie d'erreurs, mais effectue bien une analyse cognitive de la démarche de l'apprenant en regard de celle de l'expert.

CONCLUSION

L'objectif de cette thèse était d'élaborer et de programmer un modèle cognitif capable de représenter et de comparer les modèles mentaux des novices et des experts en situation de résolution de problèmes en sciences et en sciences appliquées. Cet objectif a été atteint par la mise au point d'un formalisme de représentation des modèles mentaux d'une part, et le développement d'un processus de validation de la représentation mentale de l'apprenant en regard de celle de l'expert d'autre part.

Nos lectures dans le domaine de la psychologie cognitive nous ont permis d'identifier des caractéristiques propres aux modèles mentaux des novices et des experts : un modèle mental doit être cohérent et exécutable. Ces caractéristiques sont évaluées lors du processus de validation de la représentation mentale, ce qui contribue au caractère novateur de cette étude dans le domaine des systèmes d'aide à l'apprentissage.

Le formalisme de modélisation des représentations mentales repose sur la notion de descriptions interconnectées entre elles afin de rendre compte de la démarche de résolution du problème. Les trois types de descriptions utilisables, les objets, les actions et les dépendances, permettent de formaliser les stratégies de résolution de bon nombre de problèmes mathématiquement formalisables en sciences et en sciences appliquées. Le formalisme est relativement souple et assez complet de telle sorte qu'il peut supporter non seulement la représentation mentale d'un expert mais également celle d'un apprenant.

Le processus de validation permet d'évaluer les caractéristiques du modèle mental d'un apprenant en trois étapes : l'évaluation de la cohérence de la représentation mentale, l'exécution de la représentation mentale et la comparaison de cette représentation mentale avec celle de l'expert. Le processus cherche à établir des correspondances entre les descriptions données par l'apprenant et celles données par l'expert. Si le processus relève des divergences dues à des confusions ou à des oublis, il émet des hypothèses relatives à ces divergences et tente de voir si ces hypothèses

expliquent toutes les divergences observées. Cette technique de diagnostic rejoint la démarche utilisée par Veillette (1997) qui cherche à expliquer un dysfonctionnement d'une installation en remplaçant le modèle de fonctionnement correct d'une composante par un modèle de comportements possibles en cas de pannes.

Les valeurs numériques ne sont pas prises en compte dans le processus de validation. Même si elles peuvent permettre de détecter une divergence entre la solution proposée par l'apprenant et celle proposée par l'expert, elles ne pourraient, en aucun cas, conduire à la raison de cette divergence, à moins d'avoir précompilé toutes les erreurs possibles avec les valeurs numériques correspondantes.

Le développement d'un prototype nous a permis de mettre à l'épreuve et de raffiner nos choix effectués pour l'élaboration du formalisme et du processus de validation. Ce prototype suppose que la représentation mentale de l'apprenant et celle de l'expert sont soumises au processus de validation conformément au formalisme proposé.

Les résultats obtenus à partir de divers exemples de représentations mentales d'apprenants simulées (correctes et erronées) laissent à penser que le processus de validation effectue une bonne analyse des représentations mentales qui lui sont soumises. Une piste intéressante et qui renforcerait le crédit que l'on peut apporter au formalisme et au processus que nous avons décrits serait d'approfondir la génération d'hypothèses en cas de divergences entre la représentation mentale de l'apprenant et celle de l'expert.

Plusieurs techniques issues de l'intelligence artificielle ont été utilisées et d'autres adaptées pour représenter et manipuler ces descriptions au sein du prototype : les réseaux sémantiques et les cadres conceptuels constituent l'épine dorsale du formalisme, et les règles de production ainsi que différents moteurs d'inférences qui entrent en jeu dans le processus de validation.

Notre approche, qui regroupe le formalisme et le processus de validation, constitue une architecture cognitive qui permet de représenter et de comparer des modèles mentaux relatifs à des niveaux d'expertise différents. Une étude sur les architectures cognitives [GRANT, 1995]

propose de classer les modèles et les architectures traitant de la modélisation et de la simulation cognitive dans un espace à plusieurs dimensions. Nous allons tenter de placer notre approche sur les différents axes proposés par Grant :

La première dimension concerne le degrés de dépendance à un domaine particulier : plus une approche traite d'un domaine particulier plus elle inclura des structures cognitives propres à ce domaine et aux tâches qu'il implique. Comme nous l'avons déjà mentionné, le formalisme que nous proposons est adapté à la résolution de problèmes mathématiquement ou logiquement formalisables. Dans ce cadre, le formalisme peut supporter des problèmes quel que soit le domaine dont ils relèvent, comme le prouve la diversité des exemples présentés au chapitre 7. De plus, l'approche proposée ici est totalement indépendante de la personne dont l'activité cognitive est décrite. Cette caractéristique est une des motivations premières car il s'agit d'aborder des modèles mentaux relatifs aux niveaux d'expertise allant du novice à l'expert.

La deuxième dimension est relative au degrés de spécification de l'approche. Ce degrés peut aller de la théorie abstraite à un modèle complètement codé et exécutable automatiquement. La spécification de notre approche, son implémentation ainsi que les tests qui ont été effectués permettent de placer notre approche parmi celles complètement codées, c'est à dire exécutables automatiquement.

Ces deux dimensions constituent les critères de choix dans l'élaboration d'une architecture cognitive, et comme souvent, ce choix est une affaire de compromis car ces deux dimensions, indépendance du domaine et degré de spécification, agissent l'une sur l'autre de manière négative. Plus on cherche à s'affranchir du domaine, plus il est difficile de spécifier l'architecture afin de la rendre exécutable, et vice-versa. Grant précise qu'il est très difficile de construire de bonnes architectures, précises, indépendantes du domaine, et complètement spécifiées. Il est en de même pour les modèles et les théories.

Comme nous l'avons signalé en introduction, cette étude se situe au cœur d'un projet plus vaste qui devrait mener à l'élaboration d'un système d'aide à l'apprentissage complet, basé sur l'analyse des modèles mentaux. La présente étude contribue à établir la faisabilité d'un tel projet.

Pour la suite, il serait bon de mener les études situées en amont et en aval de celle-ci. La première consiste à acquérir et à transcrire les représentations mentales et la seconde doit permettre de produire un diagnostic, à partir des résultats produits par le processus de validation (hypothèses et concordances), diagnostic qui aidera l'apprenant à revoir sa représentation mentale dans le but d'accéder à l'expertise.

Ces études font toutes deux appel à des considérations d'interfaçage entre l'apprenant et le logiciel. L'étude située en amont doit aborder la problématique de l'acquisition de la représentation mentale de l'apprenant en situation de résolution de problèmes. Elle fait également intervenir des notions d'ingénierie des connaissances afin de s'assurer d'acquérir de manière exhaustive, mais non surabondante, la représentation mentale de l'expert. Une fois les représentations mentales acquises, leur transcription selon le formalisme proposé devrait se faire aisément. L'étude située en aval fait appel à des notions de pédagogie et de didactique du domaine couvert par le problème, afin de guider l'apprenant vers un transfert efficace des connaissances abordées lors de la résolution du problème posé. Elle fait, elle aussi appel à des considérations d'interfaçage entre l'apprenant et le logiciel en ce qui a trait à la présentation du diagnostic à l'apprenant dans le but de l'amener à réviser sa représentation mentale au cas où celle-ci est erronée.

Il nous paraît difficile, pour la partie concernant le diagnostic, d'envisager un module capable d'appréhender tous les domaines de base en sciences appliquées. Chaque domaine relève d'une didactique qui lui est propre, et les connaissances préalables sont différentes et de différentes natures d'un domaine à l'autre.

À l'aide de plusieurs exemples, nous pouvons conclure que le modèle cognitif que nous proposons, composé du formalisme et du processus de validation, est très efficace lorsque le problème posé se situe dans la zone de développement proximal de l'apprenant, par contre il l'est moins lorsque l'apprenant n'a que peu d'idée de la stratégie à adopter pour résoudre le problème qui lui est posé. En effet, dans ce cas, l'apprenant risque de ne pas pouvoir formuler une démarche complète et, de ce fait, le processus ne pourra établir aucune concordance ce qui l'empêchera de confirmer ou d'infirmer les hypothèses qu'il a posées. Cet outil nous semble donc

Conclusion

être un bon support utilisable par un enseignant pour aider un apprenant à franchir la succession des zones de développement proximal qui le sépare de l'expertise.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, J. R. (1983) *The architecture of cognition*, Cambridge (MA) : Harvard University Press.
- ANDERSON, J. R. (1985) *Cognitive psychology and its implications*, San Francisco : Freeman.
- ANDERSON, J. R., C. F. BOYLE. et G. YOST (1985) *The geometry tutor*, dans A. Joshi (Ed.) proceedings of the ninth international joint conference on artificial intelligence, Los Altos : Morgan Kaufmann, p. 1-7.
- ANDERSON, J. R. et B. J. REISER (1985) *The Lisp Tutor*, Byte, Vol. 10, N° 4 p. 159-175
- ANDERSON, J. R. (1988) *The expert module*, dans M.C. Polson, J. J. Richardson (Ed.), Foundations of Intelligent tutoring systems, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates p. 21-53.
- ANDERSON, J. R., C. F. BOYLE., A. T. CORBETT et M. W. LEWIS (1990) *Cognitive modelling and intelligent tutoring*, Artificial Intelligence, Vol. 42, N° 1, p. 7-49.
- ANDERSON, J. R. (1992) *Intelligent Tutoring and high school mathematics*, Intelligent tutoring systems, Proceedings of the Second International conference, Montréal, June 1992, New-York : Springer-Verlag. p. 1-10.
- AYALA, G. et Y. YANO (1996) *Learner Models for supporting Awareness and Collaboration in a CACL Environment*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 158-167.
- BARROS COSTA, E. et A. PERKUSICH (1996) *Modeling the Cooperative Interactions in a Teaching/Learning Situation*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 168-176.
- BEALE, R. et J. FINLAY (1989) *User modelling with a neural system*, rapport technique, Department of computer science, Heslington (UK) : University of York.
- BHASKAR, R. et H. SIMON (1977) *Problem solving in semantically rich domains: An example from engineering thermodynamics*, Cognitive Science, Vol. 1, p. 193-215.
- BLAIS, D. M. (1988) *Constructivism: A theoretical revolution in teaching*, Journal of Developmental Education, Vol. 11, N° 3, p. 2-7.
- BRIEN, R. (1994) *Science cognitive et formation*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec.

- BROWN, J. S. et R. R. BURTON (1978) *Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills*, Cognitive Science, Vol. 2, p. 155-192.
- BROWN, J. S., et K. VANLEHN (1980) *Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills*, Cognitive Science, Vol. 4, p. 379-426.
- BROWN, J. S., R. R. BURTON et J. DEKLEER, (1982) *Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II and III*, dans D. Sleeman et J. S. Brown (Ed.), Intelligent Tutoring Systems, New York : Academic Press, p. 227-282
- BRUER, J. T. (1993) *School for thought. A science for the learning in the classroom*. Cambridge (MA) : MIT Press.
- BRUSILOVSKY, P., E. SHWRZ et G. WEBER (1996) *ELM-ART : an intelligent tutoring system on Word Wild Web*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 261-269
- BURTON, R. R. (1982) *Diagnosing bugs in a simple procedural skill*, dans D. Sleeman & J. S. Brown (Ed.), Intelligent Tutoring Systems, New York : Academic Press, p. 157-183.
- CAMACHO, M. et R. GOOD (1989) *Problem solving and chemical equilibrium: Successful versus unsuccessful performance*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 26, N° 3, p. 251-272.
- CARBONELL, J. R. (1970) *AI in CAI: An artificial intelligence approach to computer-aided instruction*, IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. MMS-11, N° 4, p. 190-202.
- CARLSON, D. A. et S. RAM (1990) *Hyperintelligence: the next frontier*, Artificial intelligence and language processing, Communication of the ACM, Vol. 33, N° 3, p. 311-321.
- CHAMPAGNE, A. B., L.E. KLOPPER et R. F. GUNSTONE, (1992) *Cognitive research and the design of science instruction*, Educational Psychologist, Vol. 17, N° 1, p. 31-53.
- CHI, M., P. FELOTVICH, et R. GLASER (1981) *Categorization and representation of physics problems by experts and novices*, Cognitive Science, Vol. 5, p. 121-152.
- CLANCEY, W. J. (1982) *Tutoring rules for guiding a case method dialogue*, dans D. Sleeman et J. S. Brown (Ed.), Intelligent Tutoring Systems, New York : Academic Press, p. 201-225.
- COLLINS, A. M. (1976) *Processing in acquiring knowledge*, dans R. C. Anderson (Ed.), Schooling and the acquisition of knowledge, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates,
- COLLINS, A. ET D. GENTNER (1987) *How people construct mental models*, dans D. Holland et N. Quinn (Ed.), Cultural models in language and thought, New York : Cambridge University Press, p. 243-265.

- CRAIK, K. J. W. (1943) *The nature of explanation*, Cambridge (UK) : Cambridge University Press.
- DELACÔTE, G. (1996) *Savoir apprendre: les nouvelles méthodes*, Paris : Éditions Odile Jacob.
- DENHIÈRE, G. et S. BAUDET (1992) *Lecture, compréhension de texte et science cognitive*. Paris : Presse universitaires de France.
- DÉSILETS, M. (1997) *Connaissances déclaratives et procédurales, des confusions à dissiper*. Revue des sciences de l'éducation, vol. XXIII, N°2, p. 289-308.
- DIONNE, J.-P.(1996) *Indices métacognitifs générés par rétrospection à partir d'épisodes de protocoles verbaux et visuels*. Revue des sciences de l'éducation, Vol. XXII, No3, p. 539-550.
- DREYFUS, H. L. (1989) *Misrepresenting human intelligence*, dans R. Bron (Ed.) *Artificial intelligence: The case against*, Beckenman (UK) : Croom Helm, p. 41-54.
- EBERTS, R., G. T. LANG, et M. GABEL (1987) *Expert/Novice differences in designing with a CAD system*, Proceedings of the 1987 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics, Radisson (NY)
- EHRlich, M. F., H. TARDIEU et M. CAVAZZA (dir.) (1993) *Les modèles mentaux : Approche cognitive des représentations*, Paris : Masson
- ESPINOSA, E., A. BRITO et F. RAMOS (1996) *Intelligent agent-based virtual education using the Java technology*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 270-278.
- FRASSON, C., T. MENGELLE, E. AÏMEUR, et G. GOUARDÈRES (1996) *An actor-based architecture for intelligent tutoring systems*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 57-65.
- FUJI T., T. TANIQAWA, M. KOZENI, M. INUI et T. SAEGUSA (1996) *A Case-Based Approach to Collaborative Learning for Systems Analyst Education*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 177-186.
- GENTNER, D. et A. L. STEVENS (1983) *Mental Models*, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates
- GOLDSTEIN, I. (1982) *The genetic graph: A representation for the evolution of procedural knowledge*, dans D. Sleeman et J. S. Brown (Ed.), *Intelligent Tutoring Systems* (p. 257-263). New York : Academic Press.
- GRANT, S. (1995) *Developing cognitive architecture for modelling and simulation of cognition and error in complex tasks*, <http://www.city.ac.uk/~sd351/pubs/val/text.html>

- HANISCH, K. A., A F. KRAMER et C. L. HULIN (1991) *Cognitive representations, control, and understanding of complex systems: a field of study focusing on components of user's mental models and expert/novice differences*, Ergonomics, Vol. 34, N° 8, p. 1129-1145.
- HEH, J.S., W.T. SHU, J.C.J. JEHNG et T.W. CHAN (1996) *Design and Development of a Distributed Multi-User Visual Learning Environment*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 187-196.
- ITS'96, *Intelligent tutoring systems*, Proceedings of the Third International conference, Montréal, June 1996, New-York : Springer-Verlag.
- JOHNSON, S. D. (1989) *A description of experts and novice performance differences on technical troubleshooting tasks*, Journal of Industrial Teacher Education, Vol. 26, N° 3, p. 19-37.
- JOHNSON, W. B. et J. E. NORTON (1992) *Modelling student performance in diagnostic tasks: A decade of evolution*, Educational technology, research and development, Vol. 40, N° 4, p. 81-93.
- JOHNSON, M. L. et E. SOLOWAY (1985) *PROUST: An automatic debugger for Pascal programs*, Byte, Vol. 10, N° 4, p. 179-190.
- JOHNSON-LAIRD, P. N. (1983) *Mental Models : Toward a cognitive science of language, inference and consciousness*, Cambridge (MA) : Harvard University Press.
- KAMPIS, G. (1987) *A note on Information and mental models*, Kybernetes, Vol. 17, N° 4, p. 34-40.
- KETSHER, L. (1992) *CATool - Grasping categorical aspects of mental models*, RISØ Nat. Lab., Roskilde Denmark.
- LAMBERTS, K. (1988) *A hybrid model of skill acquisition in solving physics problems*, Neural Networks, Vol. 1, p. 193.
- LARKIN, J., J. McDERMOTT, D. P. SIMON et H. A. SIMON (1980) *Expert and Novice performance in solving physics problems*, Science, Vol. 208, p. 1335-1342.
- LAUREL, B. K. (1986) *Interface as mimesis*, dans D. A. Norman, S. W. Draper (Ed.), User centered system design, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates, p. 67-86.
- LELOUCHE, R. (1988) *Comment l'informatique cognitive transforme l'E.A.O.*, Acte du 1er colloque québécois en informatique cognitive des organisations, p. 68-74.
- LEMAN, S., P. MARCENAC et S. GIROUX (1996) *A generic architecture for ITS based on a multi-agent approach*, Lecture Notes in Computer Science - ITS'96, New-York : Springer-Verlag N°1086, p. 75-83.

- LEWIS, E. L., J. L. STERN, et M. C. LINN (1993) *The Effect of Computer Simulations on Introductory Thermodynamics Understanding*, Educational Technology, Vol. 33, N°1, p. 45-58.
- LEWIS, E. L. et M. C. LINN (1994) *Heat Energy and Temperature Concepts of Adolescents, Adults and Experts: Implications for Curricular Improvements*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 31, N° 6, p. 657-677.
- LINN, M. C. et N. B. SONGER (1991) *Teaching Thermodynamics to Middle School Students: What Are Appropriate Cognitive Demands ?*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 28, N° 10, p. 885-918.
- LPA, (1996a) Lpa-Prolog Technical reference, London : Logic Programming Associates Ltd.
- LPA, (1996b) Lpa-Flex Technical reference, London : Logic Programming Associates Ltd.
- MANDL, H., J. BOLLWAHN, A. HRON et U. OESTERMEIER (1992) *A rule-based diagnosis system for identifying misconceptions in qualitative reasoning in the physical domain "superposition of motion"*, Computer-based learning environments and problem solving, Proceedings of the NATO advanced Research workshop, p. 373-389.
- MARCOS, B., K. LUNDGREN, A. BOILY, L. THÉRIEN, J. LAPOINTE, et M. VEILLETTE (1990) *THERMEX : An educational expert system for thermodynamics students*, Canadian Journal of Educational Communication, Vol. 19, N°3, p. 217-235.
- MENGEL, S. et LIVELY, W. (1992) *Using neural network to predict student responses*, proceedings of the 1992 ACM/SIGAPP symposium on applied computing - SAC '92, p. 669-676.
- MESTRE, J. et J. TOUGER, J. (1989) *Cognitive research - What's in for physics teachers*, The physics teacher, p. 447-456.
- MEURRENS, M. W. F. (1989) *La gestion du modèle de l'apprenant dans le système d'E.I.A.O. "G"*, intelligence artificielle et sciences cognitives au Québec, Vol. 1, N° 2, p. 39-45.
- MILECH, D., K. KIRSNER, G. ROY, et B. WATERS (1993) *Applications of psychology to computer-based tutoring systems*, International Journal of Human-Computer Interaction, Vol. 5, N° 1, p. 23-40.
- MINSKY, M. A. (1975) *A framework for representing knowledge*, In P. Perruchet (dir.), The psychology of computer vision, New York : Mc Graw-Hill, p. 211-280.
- NORMAN, D. A. (1983) *Some observations on mental models*, dans D. Gentner et A. L. Stevens (1983) *Mental Models*, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates, p. 7-14.
- NORMAN, D. A (1988). *The design of everyday things*, New York : Basic Books.

Références bibliographiques

- NWANA, H. S. (1996) *Software Agents : An Overview*, Knowledge Engineering Review, Vol. 11, N° 3, p. 1-40.
- PAYNE, S. J. (1988) *Methods and mental models in theories of cognitive skill*, dans J. Self (Ed.) *Artificial intelligence and human learning: Intelligent computer-aided instruction*, Londres : Chapman & Hall, p. 69-87.
- PAYNE, S. J. (1991) *A descriptive study of mental models*, Behavior and Information Technology, Vol. 10, No. 1, p. 3-11.
- QUILLIAN, M. R. (1968) *Semantic Memory*, dans *Semantic Information Processing*, M. Minsky (Ed.), MIT Press, p. 216-270.
- REITHER, F. (1981) *Thinking and acting in complex situations: A study of experts' behavior*, Simulation & games, Vol. 12, N° 2, p. 125-140.
- RIVERS, R. (1990) *The role of games and cognitive models in the understanding of complex dynamic systems*, Human-Computer interaction, INTERACT '90, p. 87-92.
- ROGERS, Y., A. RUTHERFORD et P.A. BIBBY (dir.) (1992). *Models in the mind : Theory, perspective and application*, New York : Academic Press.
- ROWE, A. L., N. J. COOKE, K. J. NEVILLE et C. W. SCHACHERER (1992) *Mental models of mental models: A comparison of mental model measurement techniques*, proceedings of the human factors society 36th annual meeting, p. 1195-1199.
- SEIN, M. K., BOSTROM, R. P. (1989) *Individual differences and conceptual models in training novice users*, Human-computer interaction, Vol. 4, N° 3, p.197-229.
- SHANK, R. et J.-P. DUPUY (1995) *Les enseignements de l'intelligence artificielle: Ce qu'on sait, ce qu'on croit savoir*, Rencontres Philosophiques de l'UNESCO, Paris.
<http://www.unesco.org/phiweb/fr/lrpu/resume/textresume/schdup.html>
- SHORTLIFFE, E. H. (1976) *Computer-based medical consultations: MYCIN*, New York : American Elsevier.
- SMITH, M. U. et R. GOOD (1984) *Problem solving and classical Genetics: Successful versus Unsuccessful Performance*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 21, N°. 9, p. 895-912.
- STAGGERS, N. et A. F. NORCIO (1993) *Mental models: concepts for human-computer interaction research*, International Journal of Man-Machine Studies, N° 38, p. 587-605.
- STEVENS, A. et A. M. COLLINS (1977) *The goal structure of a Socratic tutor*, (rapport technique No. 3518), Cambridge (MA) : Bolt, Beranek and Newman Inc.

Références bibliographiques

- TANYI, E. B, D. A. LINKENS et S. BENNET (1992) *Knowledge acquisition and hierarchical structures for modelling and simulation*, Artificial intelligence, Expert systems and Symbolic Computing, IMACS 13th World Congress, p. 60-69.
- TARDIF, J. (1992) *Pour un enseignement stratégique: L'apport de la psychologie cognitive*, Montréal : Les Éditions Logiques
- TARDIF, J. (1996) *L'entrée par la question de la formation des enseignants : le transfert des compétences à travers la formation de professionnels*. Dans P. Meirieu, M. Develay, C. Durand et Y. Mariani (DIR.), *Le transfert des connaissances en formation initiale et continue* Lyon : Centre régional de documentation pédagogique de l'Académie de Lyon, p. 31-47.
- THÉRIEN, L., J. LAPOINTE, B. MARCOS, B. et S. PIRMORADI (1990) *Des erreurs instructives*, Bulletin de l'Association Mathématique du Québec, Vol. 4, N° 3, p. 5-11.
- TISSEAU, G. (1990) *Modélisation à partir d'un énoncé informel: Le système Modelis. Applications à des exercices de Thermodynamique*, Thèse de doctorat de l'Université PARIS VI.
- TISSEAU, G. (1992) *Modelis: an artificial intelligence system which models thermodynamics textbook problems*, Intelligent learning environments and knowledge acquisition in physics - proceedings of the NATO advanced research workshop on knowledge acquisition, p. 47-61.
- VANLEHN, K. (1988) *Student modelling*, dans M.C. Polson, J. J. Richardson (Ed.), *Foundations of Intelligent tutoring systems*, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates, p. 55-78.
- VAN WYLEN, G. J., R. E. SONNTAG et P. DESROCHERS (1992) *Thermodynamique appliquée*, 2^e édition, Montréal : Édition du renouveau pédagogique Inc.
- VEILLETTE, M. (1997) *Représentation de la connaissance combinant les aspects de l'algèbre à la logique des prédicats dans un contexte de diagnostic de pannes*, Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke.
- VYGOTSKY, L.S. (1978) *Mind in society : the development of higher psychological process*, Cambridge, MA : Harvard University Press.
- WASSON, B. J. (1985) *Student models: the genetic graph approach*, rapport technique CS 85-10, Waterloo (Ontario) :University of Waterloo.
- WHITE, B. Y. et J. R. FREDERIKSEN, J. R. (1990) *Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments*, Artificial Intelligence, Vol. 42, N° 1, p. 99-157.
- WILSON, J.R. et A. RUTHERFORD (1991) *Mental models - Panacea or sidetrack?*, IEE colloquium on HCI; Issues for the factory, p. 3/1-3/3.
- WOOLDRIDGE, M. et N.R. JENNINGS (1995) *Intelligent Agents : Theory and Practice*, Knowledge Engineering Review, Vol. 10, N°2, p. 115-152.

- ZHENGXIN, C. (1988) *Building expert systems through the integration of mental models*, Proceeding of the first international conference on industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems, Vol. 2, p. 754-761.